



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# VLIV VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ NA VNĚJŠÍ OTÁČKOVOU CHARAKTERISTIKU MOTOCYKLOVÉHO ČTYŘDOBÉHO MOTORU

INFLUENCE OF THE EXHAUST PIPE ON THE SPEED CHARACTERISTIC OF THE FOUR-STROKE  
MOTORCYCLE ENGINE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID NÁDVORNÍK

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF SMOLKA

BRNO 2018

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **David Nádvorník**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Josef Smolka**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vliv výfukového potrubí na vnější otáčkovou charakteristiku motocyklového čtyřdobého motoru**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se zabývá zkoumáním vlivu různých konfigurací výfuku na točivý moment a výkon motocyklového motoru.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Základní rešerše v oblasti spalovacích motorů a vlivu jednotlivých parametrů na točivý moment a výkon.

Popsat základní úlohu výfukového potrubí.

Experimentální měření jednotlivých variant výfuku.

Porovnání měření.

Nastavení karburátorů pro vybranou variantu výfuku.

#### **Seznam doporučené literatury:**

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

STOFFREGEN, Jürgen. Motorradtechnik. Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk. Springer Verlag, 2012. ISBN 978-3-8348-1716-7.

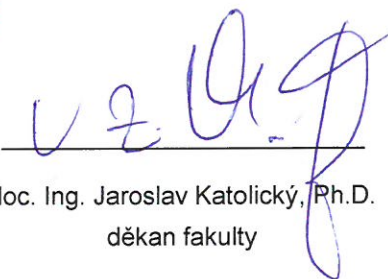
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 30. 10. 2017



---

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
ředitel ústavu



---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Obsahem této bakalářské práce je shrnutí poznatků o výfukovém potrubí motocyklu a jeho vlivu na výkon a točivý moment motoru. Dále se práce zaměřuje na přídatné systémy výfukových potrubí napomáhajících k optimalizaci průběhu točivého momentu a výkonu motoru. V závěru práce jsou obsaženy výsledky z experimentálního měření zabývající se vlivem tlumiče výfuku na křivky otáčkové charakteristiky motoru.

## **Summary**

The content of this bachelor thesis is a summary of the knowledge about the exhaust pipe of the motorcycle and its influence on the power and torque of the engine. Further, the bachelor thesis focuses on additional exhaust pipe systems which help to optimize the torque and engine performance. At the end of the thesis are included the results from the experimental measurement dealing with the influence of the exhaust silencer on the curves of the engine speed curve.

## **Klíčová slova**

Motocykl, výkon, točivý moment, výfukové potrubí, měření výkonu

## **Keywords**

Motorcycle, performance, torque, exhaust pipe, performance measurement

NÁDVORNÍK, D. *Vliv výfukového potrubí na vnější otáčkovou charakteristiku motocyklového čtyřdobého motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 50 s. Vedoucí Ing. Josef Smolka.

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Josefa Smolky a s použitím literatury uvedené v seznamu.

David Nádvorník

Tímto děkuji panu Ing. Josefu Smolkovi za ochotu a cenné rady při tvorbě této práce.  
Také děkuji svým rodičům za nedocenitelnou trpělivost a podporu při studiu.

David Nádvorník

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Zážehový motor</b>	<b>10</b>
2.1	Čtyřdobý zážehový motor . . . . .	10
2.2	Dvoudobý zážehový motor . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Základní parametry</b>	<b>12</b>
3.1	Točivý moment . . . . .	12
3.1.1	Excentrický klikový mechanismus . . . . .	14
3.2	Výkon . . . . .	16
3.2.1	Indikovaný výkon . . . . .	16
3.2.2	Ztrátový výkon . . . . .	17
3.2.3	Efektivní výkon . . . . .	17
3.2.4	Vliv atmosférických podmínek . . . . .	18
3.3	Charakteristiky motoru . . . . .	20
3.3.1	Otáčková charakteristika . . . . .	20
3.3.2	Regulační charakteristika . . . . .	20
3.3.3	Zatěžovací charakteristika . . . . .	21
3.3.4	Úplná charakteristika . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Výfukový systém</b>	<b>23</b>
4.1	Proudění plynů ve výfukovém systému . . . . .	23
4.1.1	Proudění ideální kapaliny . . . . .	24
4.1.2	Proudění skutečné kapaliny . . . . .	24
4.1.3	Hydraulické ztráty ve výfukovém potrubí . . . . .	25
4.1.4	Tlakové vlny ve výfukovém potrubí . . . . .	26
4.2	Základní části výfukového systému . . . . .	26
4.2.1	Sběrné potrubí . . . . .	26
4.2.2	Katalyzátor . . . . .	27
4.2.3	Tlumič hluku . . . . .	27
4.3	Pomocné systémy výfukového potrubí . . . . .	30
4.3.1	Yamaha EXUP . . . . .	30
4.3.2	Honda H-VIX . . . . .	31
4.3.3	Suzuki SET . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Měření výkonu motocyklu</b>	<b>34</b>
5.1	Válcový dynamometr . . . . .	34
5.2	Způsoby měření . . . . .	34
5.2.1	Dynamický výkon . . . . .	35
5.2.2	Stacionární výkon . . . . .	35
5.2.3	Ztrátový výkon . . . . .	35
5.3	Podmínky pro měření . . . . .	35
5.3.1	Zajištění motocyklu . . . . .	35
5.3.2	Chladicí zařízení . . . . .	35
5.3.3	Odvod výfukových plynů . . . . .	36

<b>6</b>	<b>Experimentální měření</b>	<b>37</b>
6.1	Motocykl . . . . .	37
6.2	Měřicí stanoviště . . . . .	37
6.3	Průběh měření . . . . .	37
6.3.1	Příprava motocyklu . . . . .	38
6.3.2	Měření s tlumičem výfuku Arrow . . . . .	40
6.3.3	Měření se standardním tlumičem výfuku . . . . .	41
6.4	Porovnání měření . . . . .	42
6.5	Nastavení karburátorů . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>49</b>



# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá výfukovým potrubím motocyklu, to neovlivňuje pouze zvuk motocyklu, jak by se mohlo na první pohled zdát, už ani není pouze odpadní trubkou odvádějící spaliny ze spalovacího prostoru do ovzduší bez žádného dalšího přínosu. Jako všechny části motocyklu prochází výfukové potrubí značným vývojem, ať už jde o prospívání životnímu prostředí, nebo vývoj v oblasti výkonu. Historicky se jako první začal řešit příliš velký hluk motocyklů, a tak započal vývoj tlumičů. S počátkem tlumení výtoku výfukových plynů se zjistilo, že při příliš velkém útlumu dochází také ke snížení výkonu. Bylo tedy potřeba najít nějaký kompromis mezi hodnotou výkonu a přijatelným hlukem motocyklu. Kvůli jeho optimalizování bylo nezbytné pochopit chování výfukových plynů ve výfukovém potrubí. V poslední roční dekádě se u motocyklů objevil ještě katalyzátor, který má omezit vypouštění škodlivých látek vyprodukovaných spalovacím motorem do ovzduší. Tímto vývojem výfukového potrubí se z jeho optimálního návrhu stala opravdová věda.

Tato bakalářská práce se zabývá právě vlivem výfukového potrubí na výkon a točivý moment motoru. Z počátku je vypracována rešerše o motocyklových spalovacích motorech z hlediska jejich konstrukce. Ta pokračuje shrnutím informací o výkonu motoru a točivém momentu, kde jsou popsány jednotlivé parametry a jejich vliv právě na tyto dvě hodnoty. Navazující kapitola popisuje základní úlohy výfukového potrubí, následuje přiblížení základního poznatku o proudění výfukových plynů ve výfukovém systému. Dále jsou popsány jednotlivé části potrubí a jejich vliv na otáčkovou charakteristiku motoru. Poslední část bakalářské práce se zabývá experimentálním ověřením vlivu výfuku na vnější otáčkovou charakteristiku motocyklového čtyřdobého motoru a vyhodnocením naměřených hodnot.

## 2 Zážehový motor

K pochopení důležitosti funkce výfukového potrubí a jeho vlivu na vnější otáčkovou charakteristiku motocyklového čtyřdobého motoru je potřeba znát základní princip funkce spalovacího motoru.

Zážehový motor je tepelný stroj s vnitřním spalováním směsi přeměňující tepelnou energii na mechanickou práci na základě periodicky se opakujících pracovních cyklů.

Nejprve je do spalovacího prostoru přivedena směs paliva a vzduchu v přesně daném poměru. Poté dochází ke stlačení směsi a jejího následného zážehnutí elektrickou jiskrou. Tlak vytvořený hořením paliva působí na píst, který přenáší pohyb přes ojnici na rameno klikového hřídele a motor tak vykonává mechanickou práci.

Pracovní cyklus probíhá ve všeobecně známých fázích v daném pořadí - sání, komprese, expanze, výfuk. Zde můžeme rozdělit zážehové motory podle konstrukce na dvoudobé a čtyřdobé. U čtyřdobého motoru dochází k nasátí směsi a následné kompresi při jedné otáčce klikového hřídele, přičemž expanze a výfuk probíhají při další. Zato dvoudobý motor zvládá všechny čtyři fáze za jedinou otáčku hřídele.

### 2.1 Čtyřdobý zážehový motor

Čtyřdobé motory se v motocyklovém průmyslu používají nejčastěji. Uplatňují se hlavně u velkoobjemových motocyklů. Oproti dvoudobému motoru mají několik výhod:

- větší schopnost plnit náročné emisní podmínky (motor nespaluje olej obsažený ve směsi),
- plynulejší nástup výkonu od nízkých otáček,
- nižší spotřebu paliva,
- klidnější chod.



Obrázek 2.1: Čtyřdobý zážehový motor [9]

## 2.2. DVOUDOBÝ ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Ale jsou také konstrukčně složitější a větší. Je zde zapotřebí složitější rozvodový mechanismus pro správné plnění válce. Zatímco u dvoudobého motoru plnění válce zajišťuje píst, u čtyřdobého je zapotřebí rozvodového mechanismu, u něhož řídí včasné otevírání a zavírání ventilů vačková hřídel. K větší konstrukční složitosti čtyřdobého motoru přispívá i složitější mazací systém.

## 2.2 Dvoudobý zážehový motor

Dvoudobé zážehové motory se vyznačují větší konstrukční jednoduchostí než čtyřdobé. Mají nižší hmotnost a vyšší měrný výkon, který vyplývá z dvojnásobného počtu pracovních zdvihů. Nižší hmotnost je dána menším počtem součástí (zcela chybí ventilový rozvodový mechanismus). Využívají se především u konstrukčně menších strojů s menšími objemy jako např. sekačky, motorové pily atd. Použití těchto motorů najdeme i v motocyklovém průmyslu. Výrobci je usazují do některých terénních motocyklů nebo motocyklů s nižší kubaturou.

Plnění válce u dvoudobého motoru je zajištěno pomocí pístu, který svým pohybem otevírá a zavírá výfukové a sací kanály. Plnění je ovšem kvůli překrývajícím se fázím sání a výfuku ovlivněno i konstrukcí výfukové soustavy. Při překrytí může dojít k nedokonalému vypláchnutí, například úniku čerstvé směsi společně se směsí spálenou, což snižuje efektivitu plnění, točivý moment motoru a zvyšuje spotřebu. Tento efekt vyžaduje vysoké nároky na návrh výfukového potrubí. [9]



Obrázek 2.2: Dvoudobý zážehový motor [9]

## 3 Základní parametry

Nejpodstatnějšími parametry spalovacího motoru vypovídající o vlastnostech motoru jsou jednoznačně výkon a točivý moment. U jednostopých vozidel může mít průběh výkonu a nárůst točivého momentu veliký vliv na ovladatelnost motocyklu. Výrobci se snaží docílit co nejlineárnější výkonové křivky, aby nedocházelo k nečekaným změnám výkonu a motocykl byl pro řidiče bezpečně ovladatelný. U motocyklů se pohybujeme ve velikých poměrech mezi velikostí výkonu a váhou motocyklu. To může za zhoršených adhezních podmínek (např. déšť, štěrk na vozovce) výrazně ovlivnit ovladatelnost, jelikož dochází k velkému nárůstu výkonu motocyklu. Ten může zapříčinit ztrátu přilnavosti kola vůči vozovce a ztrátě kontroly nad motocyklem. Proto je v oblasti výkonu kladený značný nárok na konstruktéry.

### 3.1 Točivý moment

Točivý moment je jednoznačně jedním ze základních parametrů popisujících vlastnosti motoru. Někdy se označuje také jako moment *krouticí*. Vyjadřuje otáčivý účinek síly na dané těleso vzhledem k určité ose otáčení. Tento otáčivý účinek závisí na velikosti, směru a poloze působišť výsledné síly  $F_c$ .

Na klikové ústrojí spalovacího motoru působí dva druhy sil. Síly vyvolané tlakem plynů tzv. primární síly a síly setrvačné, tzv. sekundární síly.

Primární síla, která působí od přetlaku plynů způsobených hořením směsi je síla  $F_p$ . Ta vzniká v uzavřeném spalovacím prostoru a působí v ose válce. Přenáší se jak na píst a dále do klikového ústrojí, tak i na stěny a hlavu válce. Vyjádření této síly z hlediska jejího působení na klikový mechanismus je jako součin maximálního tlaku na píst a plochy jeho průřezu. [7]

Síla daná tlakem plynů působících na píst je vyjádřena vztahem: [15]

$$F_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (p_1 - p_0) \quad [N] \quad (3.1)$$

Kde	$p_1$	tlak ve spalovacím prostoru,
	$p_0$	tlak v klikové skříni,
	$D$	průměr (vrtání) válce.

Dále na klikové ústrojí působí setrvačná síla  $F_s$ . Setrvačná síla posuvných částí klikového ústrojí je negativní síla, která je vyvolána setrvačnými silami hmotnosti koruny pístu a části ojnice při doběhu pístu do horní úvrati. Její hodnota vychází ze základní rovnice druhého Newtonova pohybového zákona a je dána součinem hmotnosti a zrychlení posuvných částí: [7]

$$F_s = m_p \cdot a \quad [N] \quad (3.2)$$

Kde	$m_p$	hmotnost posuvných částí,
	$a$	zrychlení posuvných částí.

### 3.1. TOČIVÝ MOMENT

Celková síla působící na píst se poté skládá ze síly od tlaků plynů  $F_p$  a setrvačné síly  $F_s$ . [15]

$$F_c = F_p + F_s \quad [N] \quad (3.3)$$

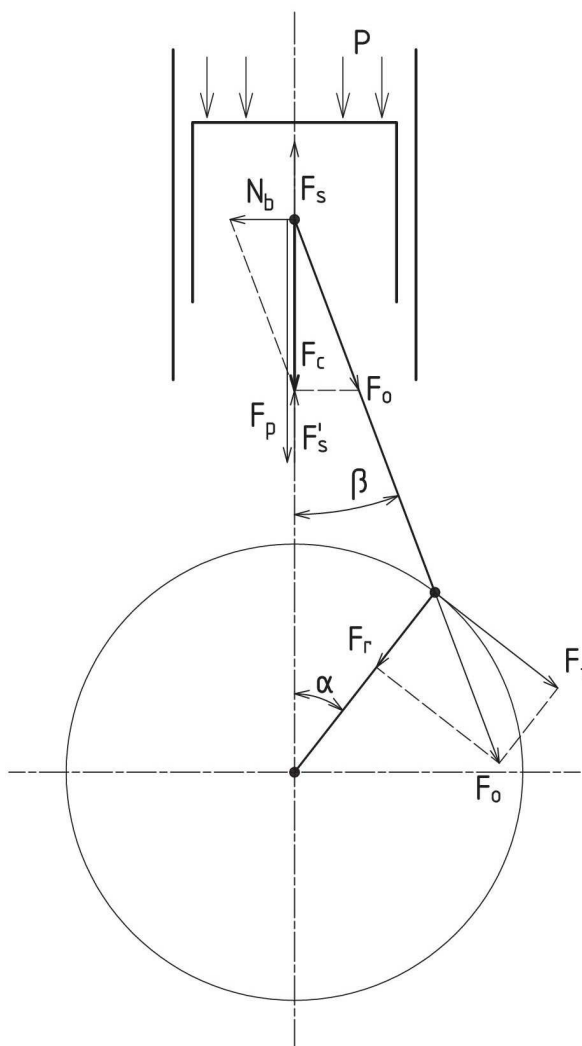
Celková síla se rozkládá na sílu působící v ose ojnice  $F_o$  a na normálovou sílu  $N_b$ , kterou zachycuje stěna válce. Tyto síly jsou vyjádřeny vztahy: [15]

$$F_o = \frac{F_c}{\cos \beta} \quad [N] \quad (3.4)$$

$$N_b = F_c \cdot \tan \beta \quad [N] \quad (3.5)$$

V ojničném čepu se poté síla  $F_o$  rozkládá na složku radiální  $F_r$ , a tečnou  $F_t$ , určující velikost a průběh točivého momentu motoru  $M_t$ . Výsledná hodnota tečné složky je dána vztahem: [15]

$$F_t = F_c \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad [N] \quad (3.6)$$



Obrázek 3.1: Silový rozbor klikového mechanismu [15, upraveno]

### 3.1. TOČIVÝ MOMENT

Pro výsledný krouticí moment tedy platí: [15]

$$M_t = F_t \cdot r_k = F_c \cdot r_k \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad [Nm] \quad (3.7)$$

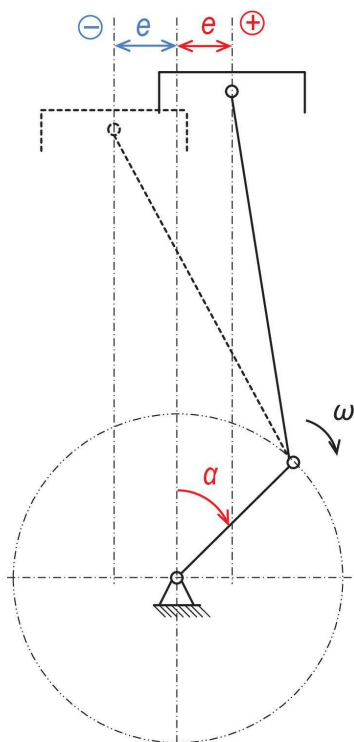
Kde  $r_k$  je poloměr ramene klikového hřídele.

V údajích o motocyklu se nejčastěji uvádí nejvyšší hodnota krouticího momentu a dané otáčky motoru, při kterých motor tohoto momentu dosahuje. Průběh točivého momentu udává i zrychlení motocyklu. Pokud by motocykl jel na stále tentýž rychlostní stupeň, graf zrychlení bude vykazovat stejný průběh. Z toho lze vyvodit, že při zrychlení motocyklu záleží spíše na zpřevodování motoru než na velikosti točivém momentu. [24]

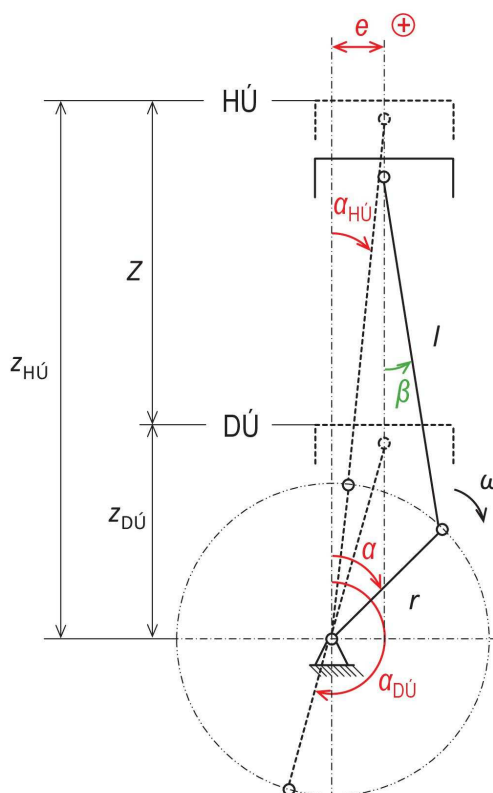
Velikostní závislost mezi krouticím momentem a výkonem je popsána vztahem 3.14. Grafická závislost je vykreslena na obrázku 3.6.

#### 3.1.1 Excentrický klikový mechanismus

Z důvodu snížení normálové síly působící od tlaku plynů na plášť válce  $N_b$ , která způsobuje třecí ztráty mezi pístem a válcem, se v poslední době konstruktéři uchylují k excentrickému provedení klikového mechanismu. U této varianty se síla přitlačující píst na válec zmenší a tím poklesnou i třecí ztráty.



Obrázek 3.2: Kinematika excentrického mechanismu [14]



Obrázek 3.3: Excentrický zdvih pístu [14]

Excentricita se značí písmenem  $e$  a touto hodnotou se rozumí vzdálenost osy válce od středu otáčení klikové hřídele. Rozlišujeme dva druhy excentricity – kladnou a zápornou.

### 3.1. TOČIVÝ MOMENT

Kladná excentricita jde ve směru otáčení klikového hřídele naopak záporná jde ve směru protějším (viz obr.3.2).

U centrického klikového mechanismu je zdvih pístu roven dvojnásobku poloměru ramene klikového hřídele. U mechanismu excentrického tomu tak není, jak je vidět na obrázku 3.3. Hodnota zdvihu pístu roste s hodnotou excentricity. Jeho vztah je následující, pro zdvih pístu v horní úvrati: [14]

$$Z_H = \sqrt{(l + r_k)^2 - e^2} \quad [mm] \quad (3.8)$$

A pro zdvih pístu v dolní úvrati: [14]

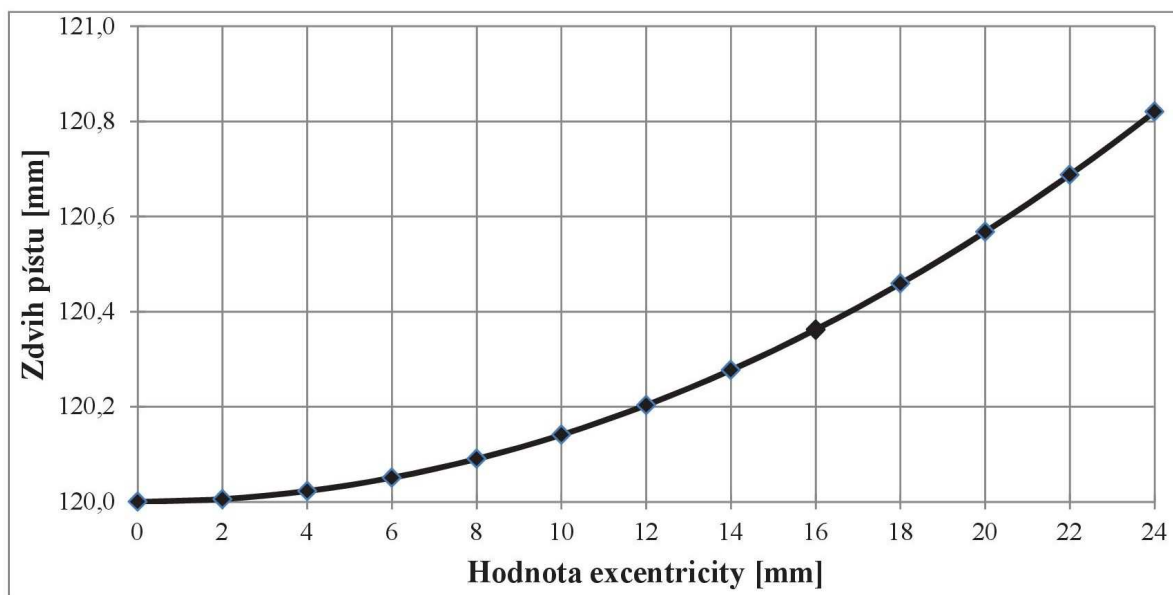
$$Z_D = \sqrt{(l - r_k)^2 - e^2} \quad [mm] \quad (3.9)$$

Kde  $l$  délka ojnice,  
 $r_k$  poloměr ramene klikového hřídele,  
 $e$  excentricita.

Pro excentrický zdvih pístu znázorněný na obrázku 3.3 platí vztah: [14]

$$Z = Z_H - Z_D \quad [mm] \quad (3.10)$$

Zvětšením zdvihu pístu vzroste zdvihový objem, který má vliv na efektivní výkon motoru (viz rovnice 3.13).



Obrázek 3.4: Ukázka závislosti zdvihu pístu na hodnotě excentricity [2]

## 3.2 Výkon

Další veličina, která udává základní vlastnosti motoru je výkon. Výkon je skalární veličina, která udává velikost vykonané práce za jednotku času. Velikost lze vyjádřit číselnou hodnotou při jmenovitých otáčkách nebo pomocí grafické závislosti v celém rozsahu otáček motoru (viz otáčková charakteristika, kapitola 3.3.1).

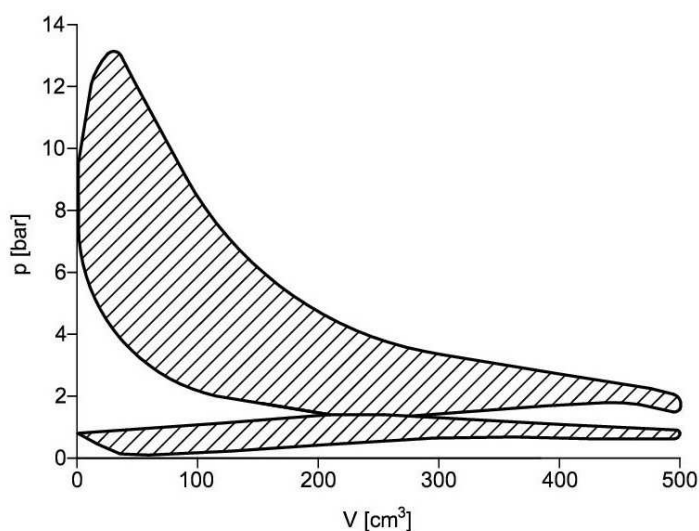
Základní jednotkou udávající výkon je 1 Watt. V motocyklovém průmyslu se ovšem udávají hodnoty výkonů spalovacích motorů v přijatelnějších kilowattech. Často se můžeme setkat i s jednotou HP, která vychází z anglického *horsepower*. Dříve byla často využívána, dnes se s ní můžeme setkat převážně jen v souvislosti s hodnotou výkonu spalovacího motoru. S jednotkou horsepower přišel v 18. století James Watt, který potřeboval tehdejšími lidmi popsat výkon svých parních strojů pomocí zvířecí síly. A tak stanovil následující definici: „Jedna koňská síla je rovna výkonu, který podává soustavně pracující kůň, který zapřažený v žentouru zdvihá náklad 180 liber a ujde při tom za hodinu 144 koleček o poloměru 12 stop.“ [19] Z těchto údajů vypočítal, že kůň je schopný vykonat práci 33 000 lbs·ft/min = 1 HP, což odpovídá hodnotě 735,49875 Wattů.

### 3.2.1 Indikovaný výkon

Ze vztahu 3.11 vyplývá, že indikovaný výkon je dán prací  $W_{i/1}$  za celý pracovní oběh spalovacího motoru při zanedbání ztrát. Plochu indikované práce určíme z indikátorového p-V diagramu 3.5. U víceválcových motorů je výsledná indikovaná práce oběhu rovna součtu prací diagramu každého válce. [1]

$$P_i = W_{i/1} \frac{n}{k \cdot 60} \quad [kW] \quad (3.11)$$

Kde	$W$	indikovaná práce oběhu,
	$n$	otáčky motoru,
	$k$	koefficient (pro dvoudobý motor $k=1$ , pro čtyřdobý motor $k=2$ ).



Obrázek 3.5: Indikátorový diagram [27]



### 3.2. VÝKON

Indikovaný výkon lze také získat ze vztahu 3.12 za použití zdvihového objemu a indikovaného středního tlaku, který získáme výpočtem z indikátorového diagramu 3.5 odečtením ploch pro sací a výfukový systém. Počet válců je ve vzorci vyjádřen jako  $i_v$ . [1]

$$P_i = \frac{p_i \cdot V_z \cdot n}{k \cdot 60} \cdot i_v \quad [kW] \quad (3.12)$$

Kde  $p_i$  střední indikovaný tlak oběhu,  
 $V_z$  zdvihový objem motoru,  
 $i_v$  počet válců motoru,  
 $n$  otáčky motoru,  
 $k$  koeficient (pro dvoudobý motor  $k=1$ , pro čtyřdobý motor  $k=2$ ).

#### 3.2.2 Ztrátový výkon

Z vypovídajícího názvu lze poznat, že se jedná o výkon spotřebovaný vlivem mechanických ztrát motoru. „Podle norem DIN se k třecím ztrátám počítá také výkon pro pohon pomocných agregátů jako je alternátor, kompresor klimatizace nebo čerpadlo pro posilovač řízení.“ [27]

Tabulka 3.1: Podíl ztrát jednotlivých skupin u motoru zážehového a vznětového v procentech ztrátového výkonu [27]

Ztráty	Zážehový motor [%]	Vznětový motor [%]
tření píst — válec (kroužky — válec)	45	50
tření ložisek klikového a vačkového hřídele	23	24
ztráty na výměně náplně válce motoru (výfuk, sání)	20	14
pohon rozvodového mechanismu	6	6
pohon pomocných zařízení	6	6

#### 3.2.3 Efektivní výkon

Efektivní výkon, někdy označovaný jako *užitečný*, je závislý na ztrátovém výkonu a lze ho odebírat na výstupním hřídeli motoru. Tato hodnota udává výkon, který je využit k samotného pohonu vozidla, ale také k pohonu pomocných zařízení. Hodnota efektivního výkonu je oproti indikovanému výkonu nižší o ztráty zahrnuté ve ztrátovém výkonu ( $P_e = P_i - P_m$ ). Dále je dán analogickým vztahem výkonu indikovaného: [1]

$$P_e = \frac{p_e \cdot V_z \cdot n}{k \cdot 60} \cdot i_v \quad [kW] \quad (3.13)$$

Kde  $p_e$  střední efektivní tlak oběhu,  
 $V_z, i_v, n, k$  viz vztah 3.12.

Ze vztahu 3.13 vyplývá, že pro dosažení většího efektivního výkonu můžeme buďto zvětšit počet válců nebo navýšit zdvihový objem motoru. Tato opatření provádíme na úkor velikosti a hmotnosti motoru. Dále lze efektivní výkon navýšit zvyšováním otáček motoru, toho se využívá spíše při ladění závodních motocyklů. Jako poslední se nabízí

### 3.2. VÝKON

zvyšování efektivního tlaku, čehož lze dosáhnout např. turbodmychadlem, se kterým se u motocyklů nesetkáme.

Efektivní výkon lze také spočítat z naměřených hodnot, a to konkrétně z točivého momentu  $M_t$  na výstupním hřídeli motoru a příslušných otáček motoru  $n$ . Potom platí: [1]

$$P_e = M_t \cdot \omega = \frac{M_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad [kW] \quad (3.14)$$

Kde	$M_t$	točivý moment,
	$\omega$	úhlová rychlost,
	$n$	otáčky motoru.

#### 3.2.4 Vliv atmosférických podmínek

Na výkon motoru mají také značný vliv dané atmosférické podmínky, které ovlivňují plnicí účinnost motoru. Vyhodnocení plnění válců lze získat pomocí vztahu teoretického stupně plnění 3.15: [27]

$$\lambda_p = \frac{m_d}{m_t} = \frac{m_{dcelk}}{V_z \cdot \rho_t} \quad [-] \quad (3.15)$$

Kde	$m_d$	hmotnost čerstvé náplně dopravené do válce,
	$m_t$	hmotnost čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu válce,
	$m_{dcelk}$	hmotnost veškeré náplně dopravené do všech válců motoru,
	$V_z$	zdvihový objem všech válců motoru,
	$\rho_t$	teoretická hustota náplně.

Teoretický stupeň plnění je tedy dán poměrem mezi hmotnostmi čerstvé náplně dopravené do válce  $m_d$  za jeden pracovní oběh k hmotnosti čerstvé, která odpovídá hodnotě zdvihového objemu válce při podmínkách – tlaku a teplotě – panujících v sacím potrubí. Hmotnost čerstvé náplně dopravené do válce můžeme určit součtem hmotnosti paliva  $m_p$  na jeden válec a hmotnosti vzduchu  $m_v$  na jeden válec ( $m_d = m_p + m_v$ ).

Hodnota teoretického stupně plnění je u atmosféricky plněných zážehových motorů menší než 1. Motory s rezonančním plněním mají tuto hodnotu vyšší než 1, stejně jako motory s přeplňováním, u kterých se pomocí lepšího plnění dosahuje větších výkonů u konstrukčně menších motorů.

Teoretické množství čerstvé náplně lze získat ze stavové rovnice: [1]

$$p \cdot v = r \cdot T \quad \text{nebo} \quad p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (3.16)$$

Kde	$p$	tlak,
	$v$	měrný objem,
	$r$	měrná plynová konstanta,
	$T$	teplota,
	$V$	objem,
	$m$	hmotnost.

### 3.2. VÝKON

Spalovací motor potřebuje ke správné činnosti směs paliva a vzduchu. Hořením této směsi dochází k chemické reakci a vytvoření plynů působících silou na píst, čímž motor vykonává práci. Velikost této výsledné práce zážehového motoru je ovlivněna nejen správným plněním válců, ale také množstvím a vlastnostmi spalovaného vzduchu a paliva tvořící směs.

Pro dokonalý oxidační proces – úplné vyhoření paliva – je zapotřebí na 1 kg paliva přivést nejméně teoretické množství atmosférického vzduchu. Směs, která obsahuje pouze teoretické množství vzduchu, se nazývá stechiometrická. Pro zážehový motor je nezbytné přivést 14,7 kg vzduchu na 1 kg paliva. Tento poměr mezi množstvím vzduchu a paliva se označuje jako bohatost směsi. Ta se vyjadřuje pomocí součinitele přebytku vzduchu, jehož hodnotu udává rovnice: [1]

$$\lambda = \frac{M_V}{M_p \cdot L_{VT}} \quad [-] \quad (3.17)$$

Kde	$M_V$	hmotnost suchého vzduchu směsi,
	$M_p$	hmotnost paliva ve směsi,
	$L_{VT}$	teoretické množství suchého vzduchu potřebné k dokonalé oxidaci 1 kg paliva.

Součinitel  $\lambda$ : [27]

$\lambda = 1$  – skutečně přivedená hmotnost vzduchu odpovídá teoretické potřebě

$\lambda < 1$  – nedostatek vzduchu neboli bohatá směs

$\lambda > 1$  – přebytek vzduchu neboli chudá směs

Výpočet teoretického množství čerstvé náplně 3.16 je ovlivněn vlastnostmi vzduchu, který do náplně vstupuje. U nepřepřlňovaných motorů jsou teplota a tlak hodnotami okolními - atmosférickými.

Vliv atmosférických hodnot stavových veličin na výkon je následující.

#### Atmosférická teplota

Hustota plnicího vzduchu je ovlivněna jeho teplotou, která má vliv na plnicí účinnost motoru (viz rovnice 3.15). S rostoucí teplotou vzduchu klesá jeho hustota. To zapříčiní, že do válce o daném objemu je dopravena menší hmotnost čerstvé náplně a směs vyvine méně tepla při spalování – menší výkon motoru. U zážehových motorů může zvýšení atmosférické teploty vyvolat detonační chod. Naopak při hodnotě příliš nízké dochází ve spalovacím prostoru, kvůli vysoké hustotě vzduchu, k nehomogennímu míšení směsi. To může vést k vynechávání motoru nebo zvýšení produkce emisí uhlovodíků a oxidu uhelnatého, což je důsledek špatného spalování. [1]

#### Atmosférický tlak

Tlak spalovaného vzduchu má přímý vliv na výkon motoru. Zvýšení nebo naopak snížení atmosférického tlaku ovlivňuje množství čerstvé směsi, kterou dokáže motor nasát do spalovacího prostoru a poté přeměnit v teplo. Tímto je ovlivněn i výkon motoru. Stejněho principu využívají přepřlňované motory, které pomocí turbodmychadla nebo kompresoru dokáží navýšit střední efektivní tlak – množství čerstvé směsi.

Hodnota atmosférického tlaku vzduchu je závislá na více faktorech v daném místě (nadmořská výška, velikost tíhového zrychlení, teplota a hustota atmosféry). Z tohoto

### 3.3. CHARAKTERISTIKY MOTORU

důvodu byla stanovena referenční hodnota, zvaná *normální tlak vzduchu*, která má hodnotu 101 325 Pa.

#### Atmosferická vlhkost

Atmosférický vzduch je vždy směsí suchého vzduchu a vodní páry, proto se nazývá vlhký vzduch. Přiměřená vlhkost vzduchu ve spalovacím prostoru je nezbytná ke správnému oxidačnímu procesu - dokonalému spálení směsi. Nadměrná vlhkost přítomná v pracovní náplni má pozitivní, ale i negativní účinky. Velmi vysoká vlhkost spalovaného vzduchu je nežádoucí, z důvodu snížení výkonu motoru. To je zapříčiněno větším množstvím vodní páry, která ve válci zabírá určitý prostor na úkor možného naplnění čerstvým vzduchem, respektive směsí. Tím je omezena přítomnost množství kyslíku pro správný spalovací proces. Další nevýhodou vysoké vlhkosti je působení vody ve spalovacím prostoru, sacím a výfukovém systému z hlediska tvorby koroze. Mezi výhody patří chlazení spalovacího prostoru a redukce obsahu produktů nedokonalého spalování.

## 3.3 Charakteristiky motoru

Charakteristiky motoru slouží k přehledu jednotlivých vlastností motoru. Obecnou charakteristikou se rozumí závislost mezi základními provozními parametry motoru jako jsou otáčky motoru, točivý moment, střední efektivní výkon, měrná spotřeba paliva, plnicí tlak, teplota výfukových plynů, účinnosti motoru atd. Naměřené hodnoty jsou zpracovávány do grafické podoby. Tyto charakteristiky mají využití např. ve vývoji a výzkumu nového typu spalovacího motoru, posuzování stavu motoru nebo zjišťování ekonomických ukazatelů.

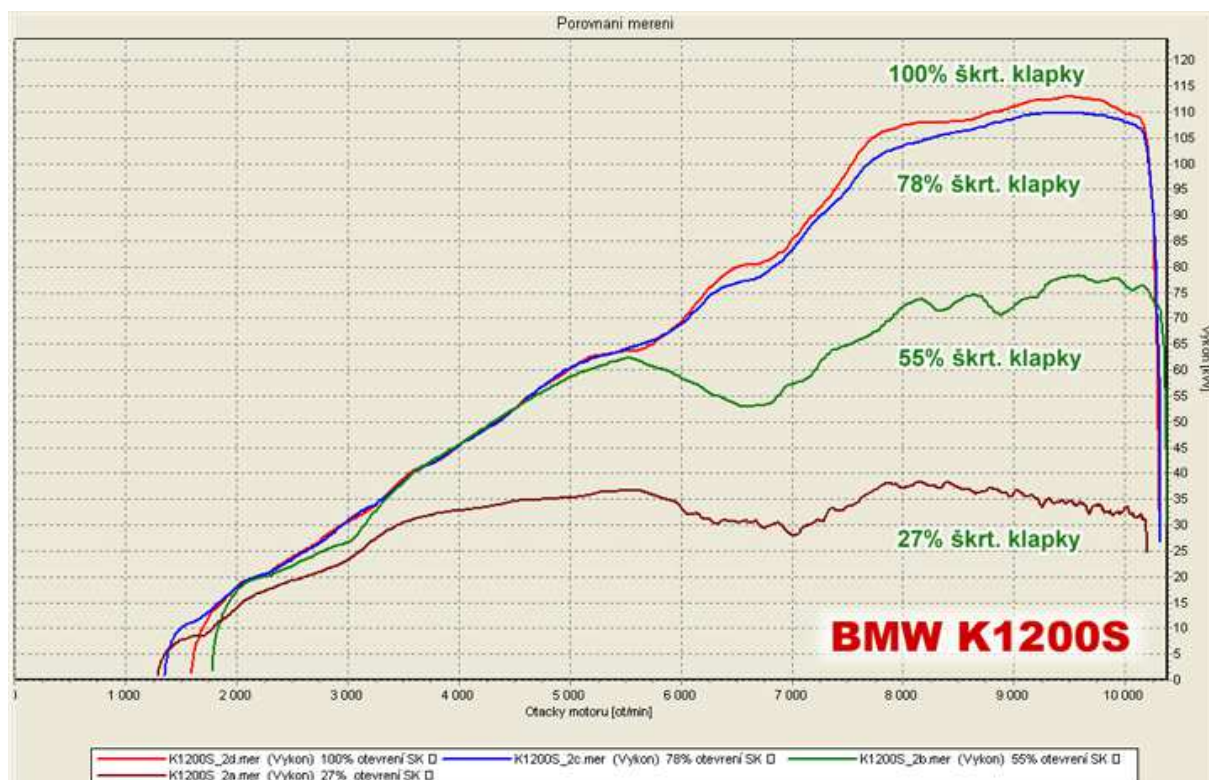
### 3.3.1 Otáčková charakteristika

Je také nazývána jako charakteristika rychlostní. Konkrétně jde o závislost mezi otáčkami  $n$  a točivým momentem  $M_t$  respektive efektivním výkonem  $P_e$ , kde jsou otáčky motoru nezávislou proměnnou. Měření probíhá za konstantního nastavení ovládacího prvku motoru. U zážehových motorů je tímto prvkem škrtící klapka, která je otevřená do maximální polohy, aby bylo dosaženo plného zatížení motoru. Jedná se o nejznámější charakteristiku využívanou nejen odborníky, ale i širokou veřejností. Ukázka otáčkové charakteristiky je na obrázku 3.6.

### 3.3.2 Regulační charakteristika

Někdy je také známá jako charakteristika nastavovací. Znázorňuje závislost provozních veličin spalovacího motoru, jako jsou např. efektivní výkon motoru nebo točivý moment, na některé konstrukční nebo provozní veličině charakterizující seřízení motoru (součinitel přebytku vzduchu, otevírací tlak trysky, časování rozvodu, složení směsi apod.). Během měření jsou podle možností vstupní parametry udržovány konstantní, jediné co se mění, je sledovaná nezávislá proměnná. Regulačních charakteristik se využívá ve vývoji, výzkumu, při navrhování systémů řízení nebo seřizování konstrukčních prvků, které mají vliv na výstupní parametry motoru.

### 3.3. CHARAKTERISTIKY MOTORU



Obrázek 3.6: Otáčková charakteristika – vliv otevření škrtící klapky na výkon motoru [30]

#### 3.3.3 Zatěžovací charakteristika

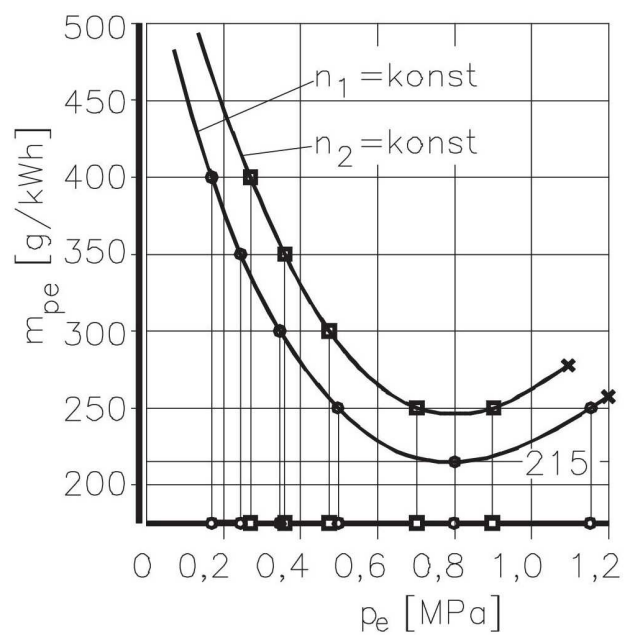
U charakteristiky zatěžovací je nezávislou proměnnou zatížení motoru, jež je popisováno hodnotou  $p_e$ , popřípadě  $M_t$ . Konstantním parametrem jsou zde otáčky motoru  $n$ . Tato charakteristika znázorňuje např. závislost měrné spotřeby paliva na některé veličině charakterizující zatížení motoru. To je možné vidět na obrázku 3.7, kde jsou zakresleny průběhy měrných spotřeb paliva  $m_{pe}$  pro dvojice různé otáčky  $n_1$  a  $n_2$ . Konstantních otáček je dosaženo pomocí měřicího zařízení, zatímco změna zatížení z minimální na maximální hodnotu se provádí změnou polohy ovládacího zařízení, regulujícího výkon motoru.

Využití lze nalézt při posuzování stacionárních motorů, ale také slouží jako podklad na konstrukci úplných charakteristik.

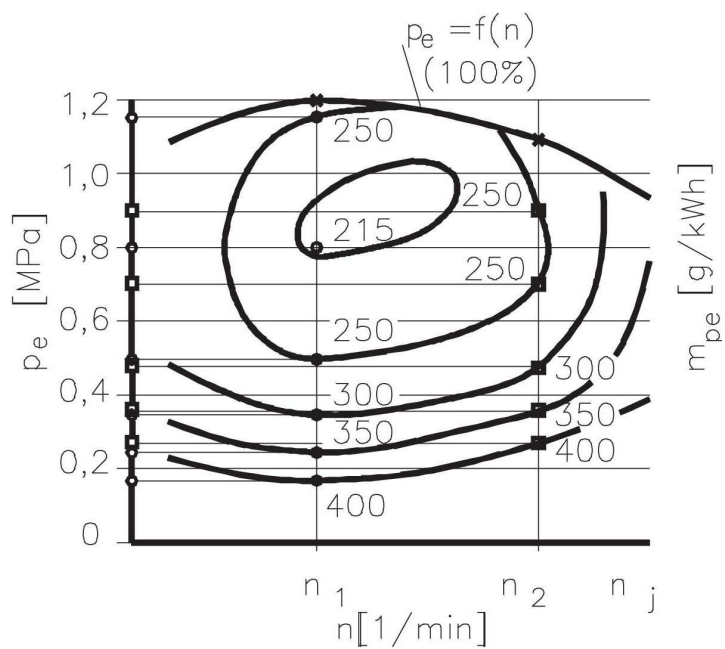
#### 3.3.4 Úplná charakteristika

Tato charakteristika umožňuje v jednom diagramu zobrazit několik závislostí současně. Jedná se o průběh křivek konstantní měrné spotřeby paliva, zatížení motoru a efektivního výkonu, které jsou popsány v souřadnicích středního efektivního tlaku a otáček motoru. Úplnou charakteristiku nelze získat přímým výpočtem nebo měřením, jelikož je sestavena z charakteristiky otáčkové a zatěžovací. Ukázka úplné charakteristiky je na obrázku 3.8.

### 3.3. CHARAKTERISTIKY MOTORU



Obrázek 3.7: Zatěžovací charakteristika [1]



Obrázek 3.8: Úplná charakteristika [1]

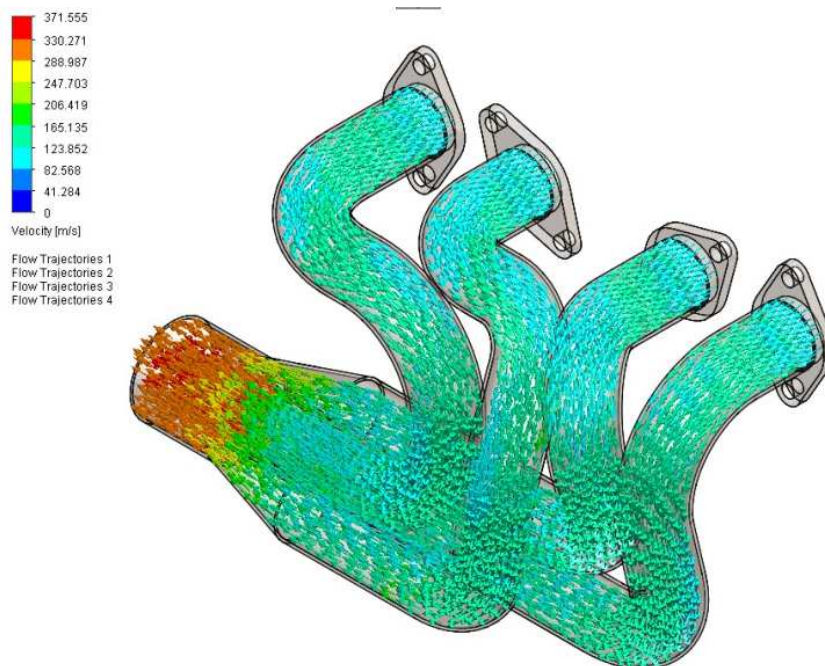
## 4 Výfukový systém

Hlavním účelem výfukového systému vozidel je bezpečný odvod spalin z pracovního prostoru válce do ovzduší. Právě kvůli zabezpečení čistoty ovzduší se neustále zvyšují nároky na snižování obsahu škodlivých emisí ve výfukových plynech a výfukový systém musí zajistit splnění daných emisních limitů předepsanou legislativou. Dále má za úkol tlumit hluk odcházejících spalin, včetně hluku vznikajícího rázy při nepravidelném proudění výfukových plynů ze silných impulzů tak, aby nebyla překročena určitá hladina hluku. Zajištění těchto emisních a hlukových nároků nutí konstruktéry k různým systémovým a konstrukčním úpravám. Musí však zajistit, aby byl proud výfukových plynů co nejméně omezován – co nejmenší odpor výtoku spalin z válce motoru – a nedocházelo tím k nežádoucímu snížení výkonu motoru.

Hluk motoru vzniká působením velkých tlaků ve výfuku. Otevření výfukového ventilu zapříčiní, že ze spalovacího prostoru začnou unikat silně stlačené a explozivně se rozpínající plyny. Unikající plyny vytvoří rázovou vlnu s velikou kinetickou energií, která při výstupu z výfukového potrubí vytváří další zvukové vlnění šířící se do okolí. Tento jev se potlačuje koncovým tlumičem výfuku, jenž díky promyšleně uspořádaným tlumícím deskám, trubičkám a absorpčním materiálům dokáže účinně tlumit rázové vlny šířící se výfukovými plyny, které mají na svědomí výstupní hluk. Lidské ucho vnímá zvuková vlnění (počet akustických nárazů za sekundu) o různých frekvencích jako různě hlasité zvuky. Práh slyšitelnosti lidského ucha je 0 dB, práh bolesti pak 130 dB. Proto by hladina hluku motorochý vozidel neměla přesahovat hodnotu 80 dB. [26]

### 4.1 Proudění plynů ve výfukovém systému

Pohyb tekutiny (kapaliny nebo plynu) výfukovým systémem je nazýván jako proudění.



Obrázek 4.1: Simulace proudění plynů ve výfukovém potrubí (SolidWorks) [12]

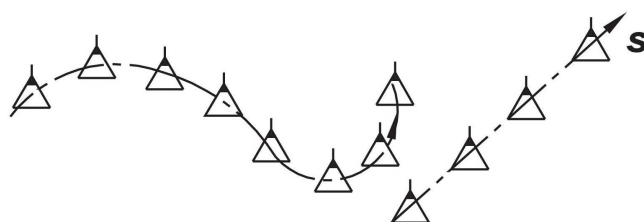
## 4.1. PROUDĚNÍ PLYNŮ VE VÝFUKOVÉM SYSTÉMU

V dnešní době se při návrhu výfukových systémů k optimálnímu průběhu proudění plynů používají simulační 3D programy. Z výsledků simulace poté může konstruktér sledovat, jestli je průběh proudění plynů optimální, zda je průřez potrubí dostatečný, popřípadě jestli nejsou potřeba provést nějaké konstrukční změny na modelu.

U pokročilých 3D řešení je nejprve důležité znát základní fyzikální zákony a vlastnosti proudění tekutin. Obecně lze proudění rozdělit podle fyzikálních vlastností na dva základní typy, proudění ideálních kapalin a proudění kapalin skutečných.

### 4.1.1 Proudění ideální kapaliny

Ideální kapalina je nestlačitelná, bez vnitřního tření a její proudění může být buďto potenciální (nevířivé) nebo vířivé. U potenciálního proudění se částice pohybují přímočaře nebo křivočaře po drahách tak, že se vůči pozorovateli neotáčejí kolem vlastní osy. Naopak u proudění vířivého se částice vůči pozorovateli natáčejí kolem vlastních os. [8]



Obrázek 4.2: Potenciální proudění [8]



Obrázek 4.3: Vířivé proudění [8]

### 4.1.2 Proudění skutečné kapaliny

Proudění skutečné kapaliny se od ideálního liší. Nejprve je zapotřebí znát odlišné vlastnosti ideálních a skutečných kapalin. Skutečná kapalina se liší vnitřním třením kapaliny a objemovou stlačitelností. V praxi se při běžných výpočtech objemová stlačitelnost zanedbává z důvodu její velikosti. Potom je proudění skutečné kapaliny v daném průřezu rozděleno podle rychlostního profilu a hodnoty Reynoldsova čísla na proudění turbulentní a laminární. Pro výpočet Reynoldsova čísla platí: [8]

$$Re = \frac{v_p \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (4.1)$$

Kde	$v_p$	rychlost proudění,
	$D_h$	hydraulický průměr potrubí,
	$\nu$	dynamická viskozita.

#### Laminární proudění

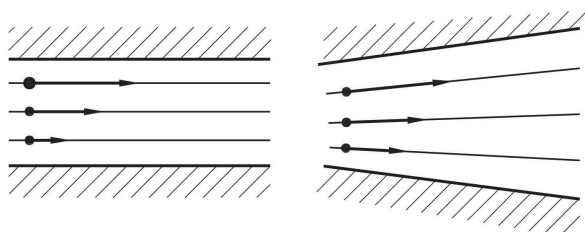
Částice se pohybují ve vrstvách (deskách) a nedochází k jejich přemísťování po průřezu. Většinou se jedná o proudění stacionární (ustálené), u kterého se rychlost proudění kapaliny v daném bodě nemění. To neplatí pro danou rychlost v průřezu. Ta má jiné hodnoty ve středu průřezu a na okraji. Ve středu je hodnota rychlosti maximální, naopak na okraji je nulová. Rychlostní profil je u laminárního proudění v potrubí rotační paraboloid a hodnota Reynoldsova čísla je  $Re < 2320$ .



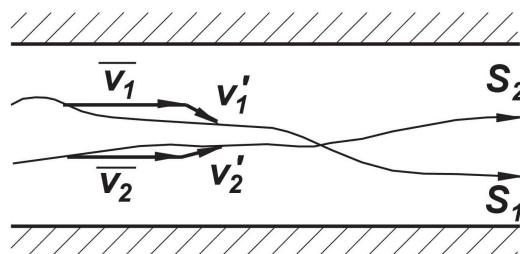
## 4.1. PROUDĚNÍ PLYNŮ VE VÝFUKOVÉM SYSTÉMU

### Turbulentní proudění

V případě turbulentního proudění platí, že pohybující se částice mají kromě rychlosti rovnoběžné se směrem proudění ještě rychlost turbulentní (flukтуаční). To je rychlost, kterou se částice přemísťují po průřezu – dochází k vzájemnému protínání proudnic (viz obrázek 4.5). Hodnota Reynoldsova čísla je  $Re > 2320$ .



Obrázek 4.4: Laminární proudění [8]



Obrázek 4.5: Turbulentní proudění [8]

### 4.1.3 Hydraulické ztráty ve výfukovém potrubí

Pokud uvažujeme skutečnou kapalinu s vnitřním třením, dochází při proudění dané kapaliny vlivem vnitřních třecích sil k hydraulickým ztrátám. Práce třecích sil, tvořená tečným napětím od viskozity, způsobuje při proudění skutečných tekutin disipaci (rozptyl) energie. To má za následek snížení mechanické energie proudící tekutiny. Tato rozptýlená energie se mění v teplo (nevratná změna), a proto se nazývá jako energie ztrátová. Při navrhování výfukového systému je tato energie nežádoucí, aby nedocházelo ke zbytečné ztrátě výkonu. Hydraulické ztráty se rozlišují na ztráty místní a délkové.

#### Místní ztráty

Jsou způsobeny změnou tvaru potrubí jako jsou kolena, armatury, měřicí zařízení apod., mezi tyto změny patří i změna průřezu potrubí. V těchto částech potrubí dochází ke změně velikosti i směru rychlosti proudění, a tím může docházet ke tvoření vírů nebo případnému odtržení proudu kapaliny. [8]

Kvůli těmto problémům se konstruktéři při navrhování výfukového systému snaží vyhnout skokovým změnám průřezu a ohybům s malými radii. Rychlost proudění totiž klesá s rostoucím průměrem výfuku – klesají i místní ztráty – a minimální radius ve výfukovém systému by neměl přesáhnout jeden a půl násobek průměru daného potrubí. [23]

Pro místní ztráty platí následující vztah: [8]

$$Y_{zm} = \xi_m \cdot \frac{v_p^2}{2} \quad [J/kg] \quad (4.2)$$

Kde  $\xi_m$  místní ztrátový součinitel,  
 $v_p$  rychlost proudění.

Místní ztrátový součinitel  $\xi_m$  se určuje experimentálně a je závislý na geometrii daného místa. Jeho velikost i velikost rychlosti proudění přímo úměrně ovlivňují velikost místních ztrát, přičemž s rychlostí rostou dokonce kvadraticky.

## 4.2. ZÁKLADNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

### Délkové ztráty

Ztráty, které vznikají třením tekutiny o stěny potrubí na dlouhých rovných úsecích a jsou dány vztahem: [8]

$$Y_{zd} = \xi_d \cdot \frac{v_p^2}{2} \quad [J/kg] \quad (4.3)$$

Kde  $\xi_d$  délkový ztrátový součinitel.

U délkových ztrát se ztrátový součinitel  $\xi_d$  nezískává experimentálně jako tomu bylo u místního ztrátového součinitele, ale je dán vztahem: [8]

$$\xi_d = \lambda_d \cdot \frac{L}{D_h} \quad [-] \quad (4.4)$$

Kde  $\lambda_d$  třecí součinitel,  
 $L$  délka potrubí,  
 $D_h$  hydraulický průměr potrubí.

Třecí součinitel je funkcí Reynoldsova čísla a relativní drsnosti povrchu. Hydraulický průměr potrubí lze získat jako poměr čtyřnásobku průtočné plochy k omočenému obvodu.

### 4.1.4 Tlakové vlny ve výfukovém potrubí

Plyny odváděné ze spalovacího prostoru výfukovým potrubím neproudí kontinuálně, jak by se na první pohled mohlo zdát, ale ve formě přetlakových a podtlakových pulsů. Tento jev je způsoben pracovními cykly spalovacího motoru, kdy dochází k otevírání a zavírání ventilů a pohybu pístu. Frekvence tlakových vln závisí na konkrétních otáčkách motoru. Pomocí délkově laděných potrubí lze využít energii vln ke zlepšení průběhu výkonu motoru a točivého momentu.

## 4.2 Základní části výfukového systému

Kvůli legislativám, které vyžadují splnění jak emisních tak hlukových norem, nemůže být výfukový systém pouhá odpadní trubka, ale musí být tvořen z více částí zařizujících splnění norem. Jednotlivé spáry a dělicí místa spojující dané části výfukového systému musí být pečlivě utěsněné, aby nedocházelo k přísávání falešného vzduchu (při ubírání plynu) nebo k úniku tlaku (při přidávání plynu). Tyto netěsnosti mohou způsobit pokles výkonu, zejména v oblasti nízkých otáček.

### 4.2.1 Sběrné potrubí

Sběrné potrubí je první část výfukového systému. Je spojena s hlavou motoru, odkud odvádí spaliny z výfukových kanálů do dalších částí výfukového systému. Mezi hlavu válce a sběrné potrubí je vkládáno metaloplastické těsnění zajišťující těsnost spojení i za vysokých teplot. Sběrné potrubí je tepelně nejvíce namáhaná část výfukového systému. Jeho teplota může dosáhnout až 900 °C.

## 4.2. ZÁKLADNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Právě svody mohou výrazně ovlivnit průběh a maximální hodnotu výkonu motoru, a to správným zvolením jejich tzv. rezonanční délky. Tato délka primárně ovlivňuje průběhy odražených tlakových vln ve výfuku a tím následně napomáhá (pokud je správně zvolena) ke správnému vypláchnutí válce. Tohoto efektu je potřeba využít zejména ve vysokých otáčkách, kde vyplachování a opětovné naplnění válce probíhá během krátkého časového úseku, což může vést k neobvyklým geometrickým tvarům potrubí (viz obrázek 4.6).

Vliv na průběh výkonu má i konstrukční provedení výfukového systému. Na obrázku 4.6 je vyobrazeno konstrukční provedení 4-2-1, které označuje přechod čtyř primárních trubek do dvou sekundárních a poté do jedné koncové. Toto provedení může u některých motorů posílit výkon ve středním spektru otáček s mírným poklesem maxima výkonu. Naopak provedení 4-1, tedy čtyři primární trubky přecházející do jedné koncové, může vést k posílení špičky výkonu využitím hybné síly plynů.



Obrázek 4.6: Sběrné potrubí pro motocykl Honda CBR 1000 RR [20]

Sběrné potrubí se vyrábí z šedé litiny nebo ze žáruvzdorných ocelí. Kvůli vysoké hmotnosti u motocyklů svody z šedé litiny nenajdeme. Aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti výfukového potrubí, často se k výrobě používá titan, který je velmi lehký, ale má vysoké výrobní náklady, nebo speciální nerezové oceli, které mají sice vyšší hmotnost, ale jejich vysoká žáruvzdornost dovoluje použití výrazně tenčí stěny než u běžných materiálů.

### 4.2.2 Katalyzátor

Katalyzátor se skládá z nerezového plechového obalu a nosiče obsahujícího aktivní katalytickou vrstvu. Slouží jako zařízení ke snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech. Účinným prostředkem je třicestný katalyzátor, který pomocí chemických procesů výrazně snižuje všechny tři škodlivé složky zároveň ( $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ) a převádí je na  $H_2O$ ,  $CO_2$  a  $N_2$ . Katalyzátor pracuje nejúčinněji při optimálním stechiometrickém složení směsi ( $\lambda = 1,0$ ), s odchylkou značně klesá účinnost zpracování. [26]

### 4.2.3 Tlumič hluku

Úkolem tlumiče hluku je snížení hladiny hluku. Motocykly musí v dnešní době splňovat přísné hlukové normy a právě tlumič hluku by měl zajistit, aby hladina hluku z motocyklu

## 4.2. ZÁKLADNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

tyto limity nepřekračovala. Dělí se podle principu odebrání energie proudících spalín na tlumiče absorpční, reflexní a interferenční. Dále jsou tlumiče, které tyto principy odebrání energie spalín kombinují.

### Absorpční tlumič

Absorpční tlumiče mají velmi malý odpor proti proudění spalín a produkují pouze malý protitlak – nedochází k velkým výkonovým ztrátám. Jsou tvořeny komorami vyplněnými žáruvzdorným a porézním materiálem, jenž dobře pohlcuje hluk. Tyto komory jsou spojené otvory, kterými proudí spaliny. Proud plynů šířící se potrubím se třením zbržďuje o tlumící materiál, který pohlcuje vibrace a tím snižuje hladinu hluku. Absorpční tlumič pohlcuje převážně hluky vyšších frekvencí.

Aby nedocházelo k tzv. vlastní rezonanci výfuku – způsobenou omezenou životností plechu – musí být tělo absorpčního tlumiče vyrobeno z odolných a dobře opracovatelných materiálů. V dnešní době jsou proto vhodným a častým materiálem uhlíkaté sloučeniny. [26]



Obrázek 4.7: Absorpční tlumič hluku [11]

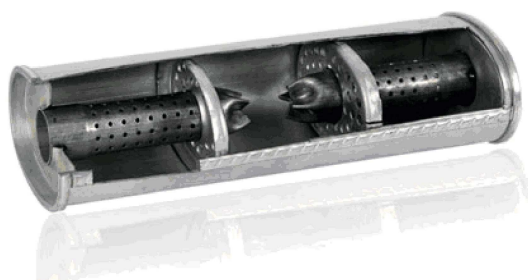
### Reflexní tlumič

Používají se ke tlumení vysokofrekvenčního a nízkofrekvenčního hluku. Při tlumení vysokofrekvenčního hluku jsou proudící výfukové plyny rozvedeny do několika za sebou umístěných komor, kde se rozpínají, a tím se zmenšuje jejich kinetická energie. Tlumení vysokofrekvenčního hluku se využívá u dvoudobých motorů a u maloobjemových vysokootáčkových čtyřdobých motorů. Při tlumení nízkofrekvenčního hluku proudí výfukové plyny trubkou s mnoha otvory, kterými se plyny rozpínají do velkého prostoru a dochází k tlumení. Nízkofrekvenční hluk produkují převážně čtyřdobé velkoobjemové motory, které se neprovozují ve vysokých otáčkách. [26]

### Interferenční tlumič

U interferenčního tlumiče je proud spalín rozdělen do několika proudů rozdílných délek. Při jejich opětovném spojení dochází k interferenci a tlakové vlny se následkem fázového posunu vyruší. Interferenční princip se většinou kombinuje s principem rezonančním. Spojením těchto dvou tlumičů lze dosáhnout silného útlumu určitých frekvencí. Ukázka in-

## 4.2. ZÁKLADNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

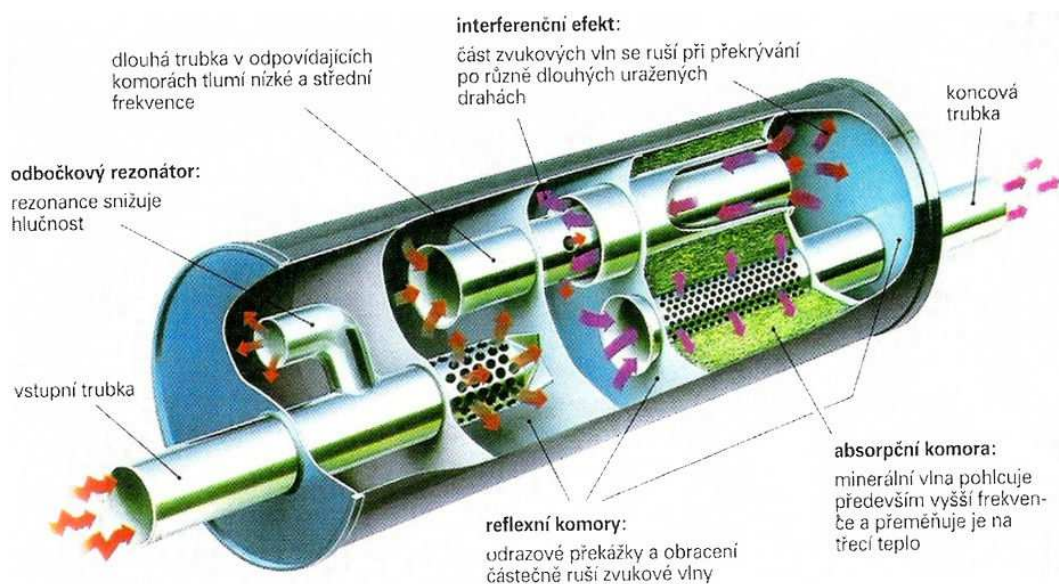


Obrázek 4.8: Reflexní tlumič hluku [25]

terferenčního tlumení je na obrázku 4.9 jako jeden z principů tlumení v kombinovaném tlumiči.

### Kombinovaný tlumič

K dosažení lepších vlastností výfuku se v dnešní době můžeme setkat s různými kombinacemi principů tlumení. Každý z těchto tlumičů funguje na daném rozmezí frekvencí a tímto spojením dokáže kombinovaný tlumič pokrýt větší frekvenční rozsah hluku.



Obrázek 4.9: Schéma kombinovaného tlumiče [4]

Na obrázku 4.9 můžeme vidět využití všech zmíněných principů tlumení v jednom kombinovaném tlumiči výfuku. Obrázek 4.10 ukazuje řez motocyklovým tlumičem, jenž kombinuje absorpční a reflexní princip tlumení.



### 4.3. POMOCNÉ SYSTÉMY VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ



Obrázek 4.10: Řez kombinovým tlumičem hluku LASER ProDuro [25]

## 4.3 Pomocné systémy výfukového potrubí

Kvůli optimalizaci odchodu výfukových plynů ze spalovacího prostoru vyvíjejí přední výrobci motocyklů různá systémová vylepšení, která napomáhají k lepší funkci výfukového potrubí v celém rozsahu otáček.

### 4.3.1 Yamaha EXUP

Zkratka EXUP pochází z anglického spojení *Exhaust Ultimate Power Valve*. Jedná se o variabilní systém přívěry ve výfukovém potrubí od firmy Yamaha určený pro čtyřdobé motory. Systém má za úkol eliminovat propady v křivce točivého momentu, tedy nežádoucí místa se sníženou hodnotou točivého momentu narušující plynulý průběh. Tohoto je využito převážně v nižších otáčkách motoru.

Funkce systému je postavena na regulaci průtoku spalin výfukem na základě daných otáček motoru pomocí elektronicky ovládané válcové klapky, která mění průřez potrubí a je umístěna pod motorem ve výfukových svodech. Spálením směsi ve spalovacím prostoru vznikají plyny, které se při otevření výfukového ventilu šíří výfukovým potrubím jako vysokotlaká vlna. Na konci potrubí dochází k odrazu a zpět proudí vlna nízkotlaká. Je-li správná délka výfukového potrubí, nízkotlaká vlna přichází zpět k výfukovému ventilu právě při opětovném otevření a pomáhá k nasání dalších výfukových plynů. Systém tak dokáže cyklus odrazových vln řídit. Systém funguje jen v určitém rozmezí otáček. Pomocí tohoto systému je docíleno zvýšení účinnosti sání, snížení spotřeby paliva, stabilizace volnoběhu a také zvýšení výkonu motocyklu. [13, 29]

Firma Yamaha tento systém poprvé použila u čtyřdobého motoru na modelu FZR400R v roce 1987. Jeho poslední verzi dostal motocykl s označením Yamaha YZF-R1 vyrobený v roce 2008. Yamaha od tohoto systému upustila a začala zdokonalovat jiné. Například systém proměnlivé délky sání YCC-I a systém elektronického plynu YCC-T.

K dosažení větší přesnosti snímá systém těchto pět parametrů (platí pro motocykl Yamaha YZF-R1): [29]

#### 4.3. POMOCNÉ SYSTÉMY VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

- otáčky motoru,
- rychlost,
- stupeň otevření škrtící klapky,
- rychlost pohybu škrtící klapky,
- poloha převodovky.

Tyto informace slouží k ovládání EXUP ventilu pro regulaci výfukového tlaku. Dále jsou informace zpracovány řídicí jednotkou a přeneseny do zapalovací jednotky, která tak optimalizuje časování zapalování. Tímto lze dosáhnout optimální odezvy v širokém rozsahu otáček při nízkých i vysokých rychlostech. [29]



Obrázek 4.11: Výfukové potrubí se systémem EXUP [29]

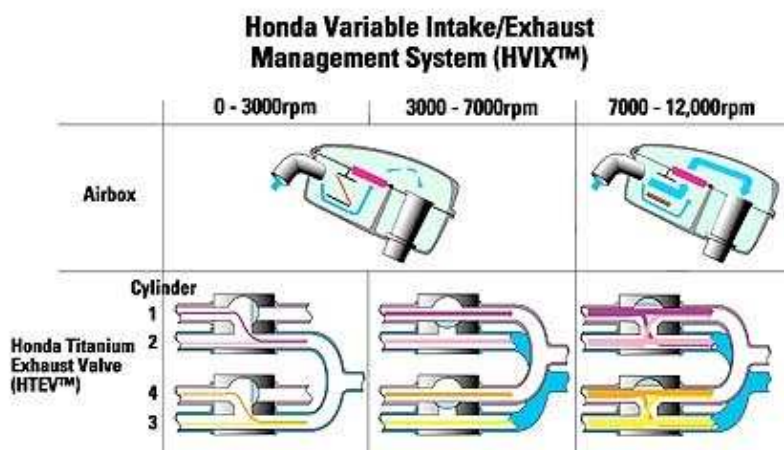
##### 4.3.2 Honda H-VIX

Výrobce motocyklů Honda také používá proměnné výfukové potrubí za účelem dosažení dobrého krouticího momentu v nižších otáčkách. Jejich systém nese název H-VIX (Honda Variable Intake/Exhaust). Jedná se o systém využívající změnu nejen u výfukového, ale i u sacího potrubí. V airboxu sacího potrubí je klapka ovládající přívod čerstvého vzduchu. Ve výfukovém potrubí se nachází otočný titanový ventil označený H-TEV (Honda Titanium Exhaust Valve) – obrázek 4.12 – umístěný v místě spoje všech primárních trubek sběrného potrubí. Ventil je ovládaný servomotorem a za pomoci rotačních klapek umožňuje třístavově spojit jednotlivé válce, a tím pozitivně využívat tlakových vln v potrubí. [16]

Schéma 4.13 popisuje funkci systému H-VIX pro čtyřválcový motor. Jak bylo řečeno v airboxu motocyklu se nachází klapka, která pomocí dvou poloh ovládá množství přivedeného vzduchu. Rozsah první polohy je 0–7 000 ot/min, kdy je klapka uzavřena a proud vzduchu proudí menším průřezem okolo. Přepnutí na polohu dvě přichází v 7 000 ot/min. V této poloze se klapka otevře a skrz airbox tak může proudit větší množství vzduchu, který motor potřebuje k optimálnějšímu spalování při vyšších otáčkách.

Výfuková část systému funguje následovně. Primární trubky sběrného potrubí jsou přivedené do ventilu H-TEV. Za ním jsou následně znovu svedeny do dvou pokračujících

#### 4.3. POMOCNÉ SYSTÉMY VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ



Obrázek 4.12: Ventil H-TEV [3]      Obrázek 4.13: Schéma funkce systému H-VIX [18]

potrubí. Potrubí z prvního válce je spojeno s potrubím čtvrtého a potrubí druhého je spojeno s potrubím válce třetího. V první poloze ventilu (0–3 000 ot/min) jsou výfukové plyny z prvního a čtvrtého válce přeměřovány do níže položených potrubí. Tímto nastavením je posílen točivý moment v nízkých otáčkách. V druhé poloze (3 000–7 000 ot/min) ventil uzavře otvory mezi horním a spodním potrubím a nechá výfukové plyny proudit bez zásahu. Systém tak tvoří konfiguraci výfukového potrubí 4-2-1, která zvýhodňuje vyšší otáčky motoru. Po dosažení hodnoty 7 000 ot/min se ventil přepne do polohy třetí a umožní tak proudícím výfukovým plynům rozdělení do obou větví potrubí.

Systém H-VIX tímto způsobem zajišťuje tři různé konfigurace potrubí, zaručující různé vlastnosti, pro různé rozsahy otáček. První použití tohoto systému bylo u modelu Honda CBR 900 RR Fireblade. [13]

##### 4.3.3 Suzuki SET

Systém SET firmy Suzuki (Suzuki Exhaust Tuning) je obdobou systému EXUP. Stará se o zlepšení průběhu točivého momentu v nízkých otáčkách. Výfukové potrubí konstruktéři nastaví tak, aby optimálně fungoval při vyšších otáčkách a v nižších otáčkách napomáhal k plynulejšímu průběhu systému SET. Suzuki používá místo válcové klapky, klapku kruhovou, která se nachází za místem sloučení jednotlivých kolen (viz obrázek 4.14).

Ventil systému SET se plně otevírá při 5 000 ot/min. Zpomalením výfukových plynů znamená, že má ventil také tlumící účinek, což Suzuki umožnilo snížit objem tlumiče hluku. Firma udává, že výsledkem systému SET je nárůst točivého momentu o 6 % a snížení emisních hodnot o 17 % oproti staršímu ročníku motocyklu bez tohoto systému. [13]



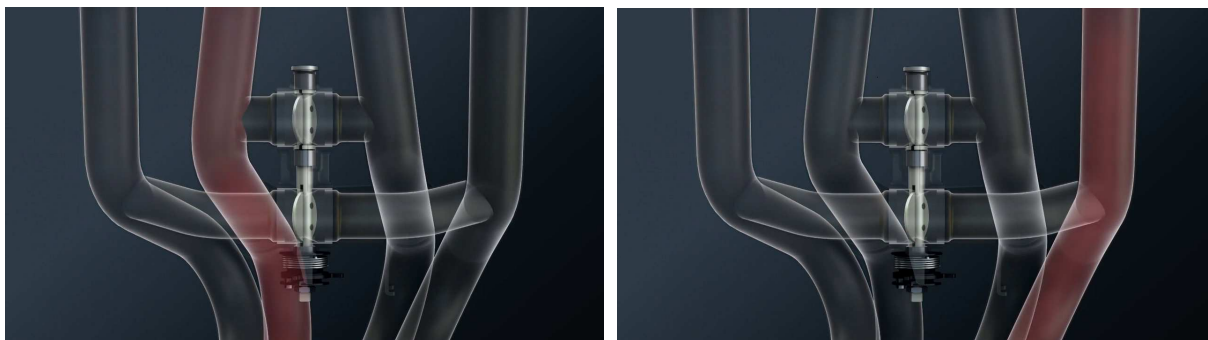
#### 4.3. POMOCNÉ SYSTÉMY VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ



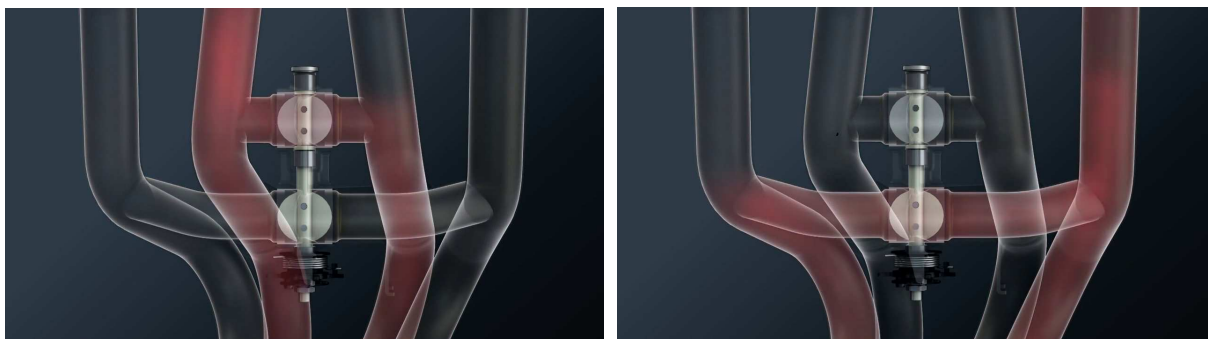
Obrázek 4.14: Ventil systému SET [6]

Systém SET byl poprvé u Suzuki použit v roce 2001 na modelu GSX-R 1000. Firma ho na svých modelech GSX-R stále používá, ale během let prošel vývojem.

Nastupující variantou tohoto systému je systém SET-A (Suzuki Exhaust Tuning-Alpha), u kterého inženýři společnosti Suzuki přidali dvě klapky ovládané servomotorem typu SET-A (viz obrázky 4.15 a 4.16). V nižších otáčkách zůstává ventil SET-A uzavřen kvůli optimálnějšímu průběhu výkonu. Naopak při vyšších otáčkách se otevře a tím významně navýší výkon. [5]



Obrázek 4.15: Průběh spalin potrubím – ventil SET-A uzavřený [22]



Obrázek 4.16: Průběh spalin potrubím – ventil SET-A otevřený [22]

## 5 Měření výkonu motocyklu

Měření výkonu lze provádět dvěma způsoby, na válcovém nebo na motorovém dynamometru. Motorový dynamometr se využívá spíše k laboratornímu měření výkonu motoru, protože měření probíhá pouze na samotném motoru, který je nutné z motocyklu vyjmout. To může být v některých případech nejen časově, ale i finančně velmi náročné. Nejrozšířenější způsob měření výkonu je tedy pomocí válcového dynamometru, který měří výkon na hnaném kole testovaného motocyklu.

Měření na samotném motoru je sice přesnější, z důvodu odpadnutí ztrát v převodech. Ale není zde zpravidla dosaženo takového uspořádání dílů jako na motocyklu, což může výsledek zkreslovat (jiná konfigurace sání, odlišné zahřátí dílů). [17]

Měření na válcové výkonové zkušebně se nevyužívá jen ke zjišťování hodnot výkonu a kroutícího momentu, ale slouží i jako diagnostická metoda, díky které jsme schopni odhalit spousty závad projevujících se například pouze při běhu motoru a určitém zatížení. Jedná se především o závady nezjistitelné klasickými diagnostickými metodami. Pomocí výkonového měření se může měřit i spotřeba paliva. Další využití lze najít například i při úpravách výfukových částí potrubí, instalaci různých filtrů nebo změnách sacího potrubí a jiných zásahů do motoru. [10]

Z důvodu použití válcového dynamometru při experimentálním měření se kapitola dále zabývá pouze tímto typem.

### 5.1 Válcový dynamometr

K měření mechanického výkonu se používají výkonové brzdy. Název brzda je odvozen z funkce, kdy proti točivému momentu motoru působí brzdňý moment. [28]

Válcové dynamometry se skládají z těchto hlavních částí: [28]

- rám,
- válec s protismykovou úpravou a definovaným momentem setrvačnosti,
- dynamometr,
- snímač rychlosti,
- ventilátor,
- hardware,
- software.

Válcové dynamometry lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní dynamometry energii zkoušeného motoru pouze odebírají, aktivní mohou pracovat i jako generátory a absorbovanou energii mohou následně vracet zpět do elektrické sítě. Což může být využito u některých typů zkoušek, při kterých nemusí běžet motor, nebo k simulaci reálných podmínek provozu. U válcových výkonových zkušeben k měření výkonu motocyklů se používají různé typy dynamometrů (vířivé, hydraulické, elektrické).

### 5.2 Způsoby měření

Na válcové výkonové zkušebně s válcovým dynamometrem lze provádět tyto metody měření:

### 5.3. PODMÍNKY PRO MĚŘENÍ

#### 5.2.1 Dynamický výkon

Nejběžnější způsob výkonového měření je dynamickou zkouškou, kdy je motor zatížen setrvačností válce i ostatních rotujících dílů. Při zkoušce je válec roztáčen zadním kolem motocyklu. Válcový dynamometr klade přesně daný odpor, ze kterého je následně výsledný výkon vypočítán pomocí vztahu 3.14. Zkouška se provádí během akcelerace motocyklu a výsledek je prakticky ihned vyhodnocen. [31]

#### 5.2.2 Stacionární výkon

Tento způsob měření je prováděn za konstantních otáček. Provádět ho lze pouze na válcových dynamometrech. U stacionárního výkonu dochází k odečítání daných otáček dynamometru a jim odpovídající hodnoty točivého momentu, který je snímán snímačem síly. Tyto hodnoty poté slouží jako základní parametry pro výpočet výkonu motoru. Metoda je oproti dynamické metodě přesnější, avšak dokáže podat pouze jednotlivé hodnoty točivého momentu při konkrétních otáčkách a ne jeho průběh. [28]

#### 5.2.3 Ztrátový výkon

Přenos točivého momentu a výkonu mezi motorem a zadním kolem motocyklu je doprovázen ztrátami. Ztrátový výkon je tedy způsobený zejména ztrátami v převodech, ztrátami vzniklými vlivem valivého a vzdušného odporu rotujícího kola. Zjištění ztrátového výkonu probíhá pomocí doběhové zkoušky, kdy je v maximální rychlosti vymáčknuta spojka a je měřeno zpomalení rotujícího zkušebního válce dynamometru. [28]

### 5.3 Podmínky pro měření

Při měření je třeba dodržovat určité podmínky, aby nedošlo k poškození motocyklu, válcové zkušebny nebo dokonce k poranění osob provádějících měření.

#### 5.3.1 Zajištění motocyklu

Motocykl musí být na válcové zkušebně správně ustaven a upevněn. Při měření dochází k velkým rychlostem a je potřeba dbát na bezpečnost, proto se upevňuje přední kolo motocyklu, aby nedošlo k jakémukoli posunu. Dále je zapotřebí upevnit zadní část motocyklu popruhy tak, aby bylo zabráněno posunu zadního kola po válci.

#### 5.3.2 Chladicí zařízení

Během měření motor dosahuje vysokých otáček a zahřívá se. Při jízdě je motor chlazen nápořem vzduchu, při výkonové zkoušce tomu tak není, a proto je třeba zajistit dostatečné chlazení. Chlazení motoru se provádí pomocí ventilátoru, který na motocykl přivádí proud vzduchu a tím ho chladí.

### *5.3. PODMÍNKY PRO MĚŘENÍ*

#### **5.3.3 Odvod výfukových plynů**

Spalovací motor produkuje během svého procesu výfukové plyny, které vycházejí výfukovým potrubím ven do atmosféry. Pokud motocykl stojí na válcové zkušebně plyny proudí ven do měřicí místnosti, proto je zapotřebí aby válcová zkušebna byla opatřena systémem na jejich odvod.

## 6 Experimentální měření

V této kapitole je popsáno experimentální měření výfukových tlumičů motocyklu a zhodnocení jejich následného vlivu na výkon motocyklu.

### 6.1 Motocykl

Měření probíhalo na motocyklu Honda CB 600F Hornet vyrobeném v roce 2004. Motocykl se řadí do skupiny klasických motocyklů o objemu 600 ccm. Poprvé byl v Evropě představen roku 1998. Jedná se o motocykl vybavený řadovým čtyřválcovým motorem chlazeným vodou. Vybrané technické parametry jsou vyobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 6.1: Technické parametry motocyklu Honda CB 600F Hornet

Objem	599 ccm
Výkon	71 kW
Výkon při otáčkách	12 000 ot/min
Točivý moment	62 Nm
Otáčky při max. toč. mom.	9 500 ot/Nm
Uspořádání válců	Řadové
Počet válců	4
Konstrukce	Čtyřdobý
Chlazení	Kapalina
Vrtání válce	65 mm
Zdvih válce	45,2 mm
Kompresní poměr	12:1
Rozvod	DOHC
Ventilů na válec	4
Příprava směsi	Karburátor
Počet rychlostí	6

### 6.2 Měřicí stanoviště

Realizace měření proběhla na měřicí stanici v Hradci Králové ve firmě Motorpower servis s.r.o. na válcovém dynamometru 1PT150 firmy JAROŠ. Zkušební zařízení poskytuje možnost měřit i ztrátový výkon převodovky, resp. náhonového ústrojí (ztráty od zadního kola po motorovou spojku). Zařízení je doplněno softwarem od společnosti MotoCOMTest sídlící v Nové Vsi u Kolína.

### 6.3 Průběh měření

Pro účely této bakalářské práce byl motocykl měřený v režimu dynamické zkoušky. Ta se realizovala během akcelerace motocyklu. Při tomto druhu zkoušky je akcelerace prováděna od určitých počátečních otáček do určité hodnoty otáček konečných. Výkon motoru a točivý moment zkoušeného motocyklu byly naměřeny při dvou konfiguracích výfukového tlumiče. Zkouška byla prováděna na šestý rychlostní stupeň.

### 6.3. PRŮBĚH MĚŘENÍ



Obrázek 6.1: Válnová zkušebna firmy Motorpower servis s.r.o.

#### 6.3.1 Příprava motocyklu

Před ustavením motocyklu na válcový dynamometr proběhla nezbytná kontrola, kterou jsme se ujistili, že během zkoušky nedojde k problémům s motocyklem. Kontrolováno bylo:

- správné nahuštění pneumatiky (zadní pneumatika 2,9 bar),
- množství olejové náplně motoru (při malém množství oleje by mohlo vlivem vysoké zátěže dojít k poškození motocyklu),
- stav sekundárního řetězu,
- stav a čistota zadní pneumatiky.

Po kontrole mohl být motocykl ustaven na válcovou zkušebnu. Nejprve bylo s motocyklem najeto do držáku předního kola a následně do něho bylo kolo sevřeno. Držák předního kola i s motocyklem byl nastaven do správné polohy tak, aby zadní kolo motocyklu dosedalo na válec dynamometru (osa zadního kola a osa dynamometru musí být v jedné rovině). Po nastavení pozice zadního kola na válcovém dynamometru byl motocykl zajištěn pomocí upínacích popruhů, aby nedocházelo k posouvání motocyklu po měřicím dynamometru.

Po ustavení motocyklu mohly být nainstalovány snímače. Nejprve byl umístěn snímač otáček z NN kabelu, který měří otáčky motoru připnutím na primární vinutí zapalovací cívky (snímač měří bezkontaktně). Dalším instalovaným snímačem byla externí lambda

### 6.3. PRŮBĚH MĚŘENÍ

sonda. Pokud by motocykl disponoval integrovanou lambda sondou došlo by k jejímu odmontování a vložení externí sondy do vzniklého otvoru ve výfukovém potrubí. Měřený motocykl touto variantou nedisponuje, a tak musela být externí lambda sonda vložena do tlumiče výfukového potrubí. Její instalace do tlumiče výfukového potrubí nepodává tak přesné informace jako předchozí zmíněná varianta. Nicméně pro tento druh měření je dostačující. Snímač externí lambda sondy určuje složení směsi. Je napájen 12 V, které zároveň zajišťují její ohřev na provozní teplotu.



Obrázek 6.2: Snímač otáček z NN kabelu (vlevo), externí lambda sonda (vpravo) [32]

Příprava motocyklu na měření byla zakončena instalací systému na odvod výfukových plynů.

**Doběhová zkouška** Před samotným měřením jednotlivých variant výfuku bylo nejprve zapotřebí provést doběhovou zkoušku z důvodu zjištění ztrát. Při ní je v maximální rychlosti motocyklu vymáčknuta spojka a následně je změřeno zpomalení válce dynamometru. Před touto zkouškou byl motocykl nejprve zahřát na provozní teplotu. Po ukončení doběhové zkoušky byly provedeny již konkrétní dynamické zkoušky s různými tlumiči výfuku.



Obrázek 6.3: Připravený motocykl na měření



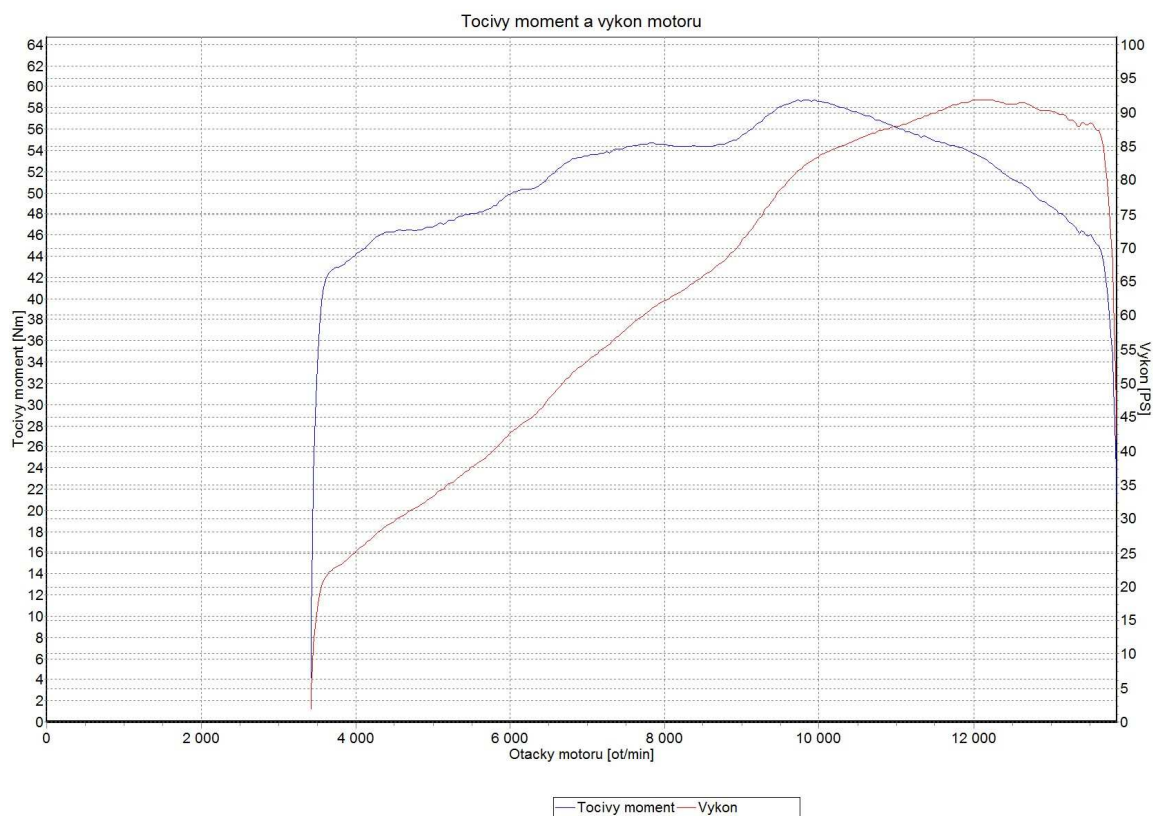
### 6.3. PRŮBĚH MĚŘENÍ

#### 6.3.2 Měření s tlumičem výfuku Arrow



Obrázek 6.4: Tlumič Arrow s externí lambda sondou

Nejprve probíhalo na válcové zkušebně dynamické měření s tlumičem výfuku značky Arrow – s tímto tlumičem je motorka provozována. Jedná se o homologovaný tlumič od italského výrobce. Naměřený průběh točivého momentu a výkonu motocyklu s výfukem Arrow je zobrazen na obrázku.



Obrázek 6.5: Výsledný graf měření s tlumičem Arrow



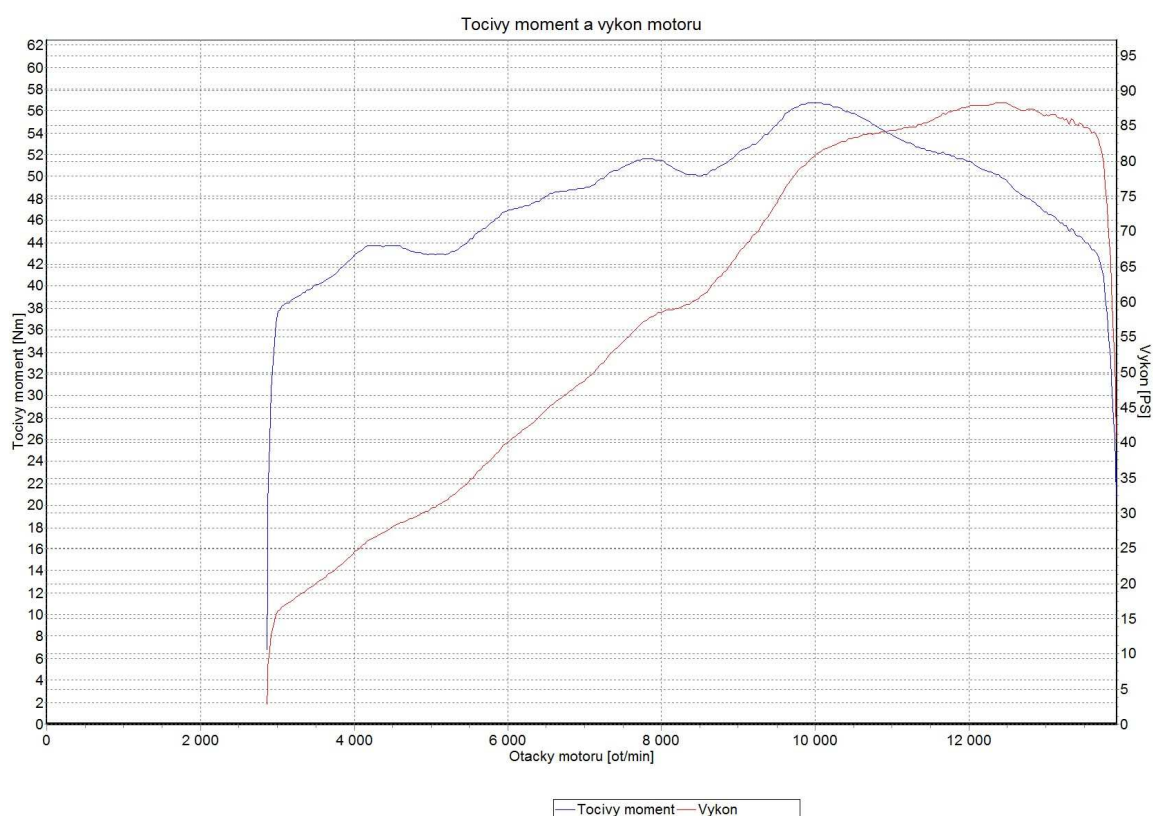
### 6.3. PRŮBĚH MĚŘENÍ

#### 6.3.3 Měření se standardním tlumičem výfuku



Obrázek 6.6: Měření se standardním tlumičem

Po měření s tlumičem výfuku Arrow byl výfuk sundán a nahrazen standardním, který je na tyto motocykly dáván výrobcem. Naměřený průběh točivého momentu a výkonu motocyklu se standardním výfukem je zobrazen na obrázku.

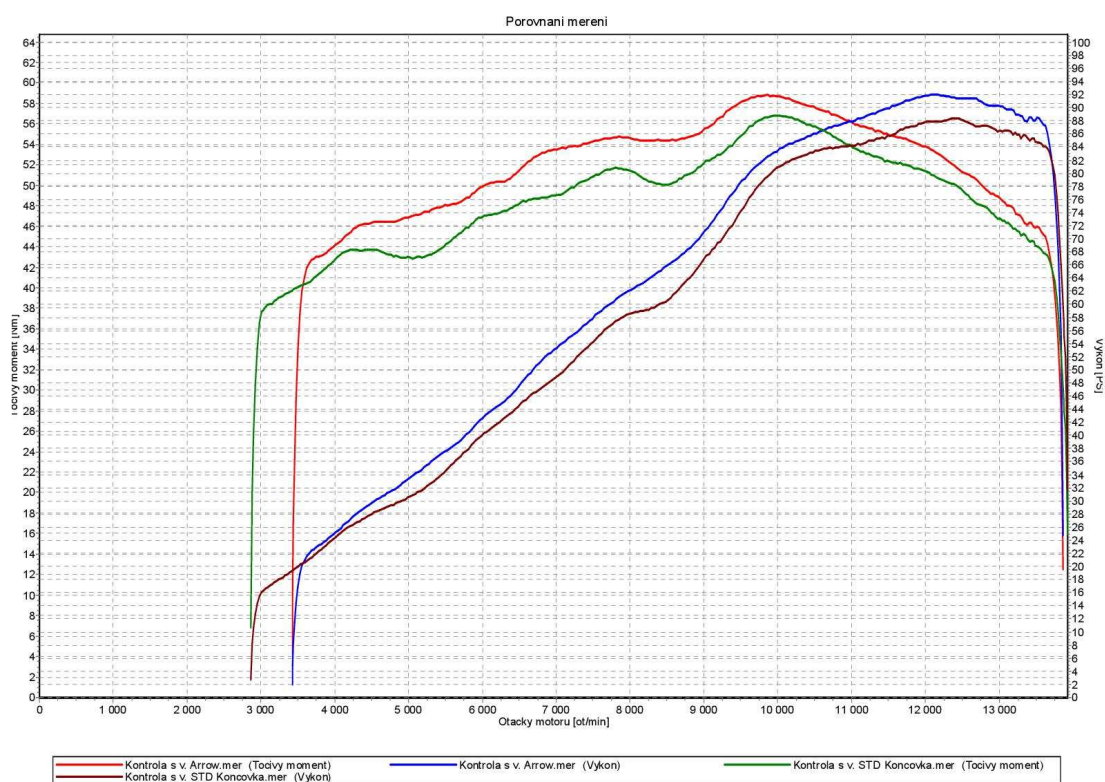


Obrázek 6.7: Výsledný graf měření se standardním tlumičem

## 6.4 Porovnání měření

Před vyhodnocením samotných výsledků měření je vhodné znát prvotní předpoklady. Vycházelo se z předpokladu, že standardní výfukový tlumič dodávaný výrobcem je navržený tak, aby splňoval emisní, hlukové i finanční nároky. Což vedlo ke konstrukčnímu provedení, které různými způsoby více omezilo proudění výfukových plynů z tlumiče. Byl tedy očekáván spíše neurovnaný výkonový průběh. Dále bylo předpokládáno, že výfukový tlumič značky Arrow je navržen tak, aby vyhladil výkonovou křivku a docílil plynulejšího průběhu výkonu po celém rozsahu otáček bez výrazných výkonových propadů. Nicméně za daného nastavení karburátorů motocyklu nebyl, očekáván nárůst výsledné hodnoty maximálního výkonu, oproti maximální hodnotě výkonu motoru se standardním tlumičem.

K přehlednější srovnání výsledků měření byly charakteristiky vloženy do společného grafu.



Obrázek 6.8: Graf porovnání měření

Z výsledného grafu otáčkové charakteristiky je vidět, že tlumič výfuku Arrow dosahuje při daném nastavení motocyklu vyšší maximální hodnoty výkonu i maximální hodnoty točivého momentu. To je pravděpodobně způsobeno tím, že výfukový tlumič Arrow je konstruován spíše tak, aby kladl výfukovým plynům menší odpor a při jejich průchodu tlumičem nedocházelo k tak velkým ztrátám měrné energie plynů. Naměřená hodnota maximálního točivého momentu motoru se standardním výfukem byla 56,82 Nm při 9 985 ot/min, naměřený maximální výkon 88,38 PS (65 kW) při 12 384 ot/min. Hodnoty s výfukovým tlumičem Arrow se pohybovaly o něco výše. Maximální točivý moment naměřený s výfukem Arrow byl 58,85 Nm při 9 856 ot/min, maximální výkon 91,99 PS

## 6.5. NASTAVENÍ KARBURÁTORŮ

(67,66 kW) při 12 139 ot/min. Pokud bude počítáno s možnou chybou měření lze z těchto hodnot usoudit, že tlumič výfuku maximální hodnoty výkonu a točivého momentu až tak výrazně neovlivní. Rozdíl hodnoty výkonu něco přes dva kilowatty člověk na obvyčejné silnici v provozu nejspíš nijak nepozná, nicméně pro člověka využívajícího svůj motocykl i na závodní trati, kde je každá kilowatta navíc přínosem, to může být nápomocné.

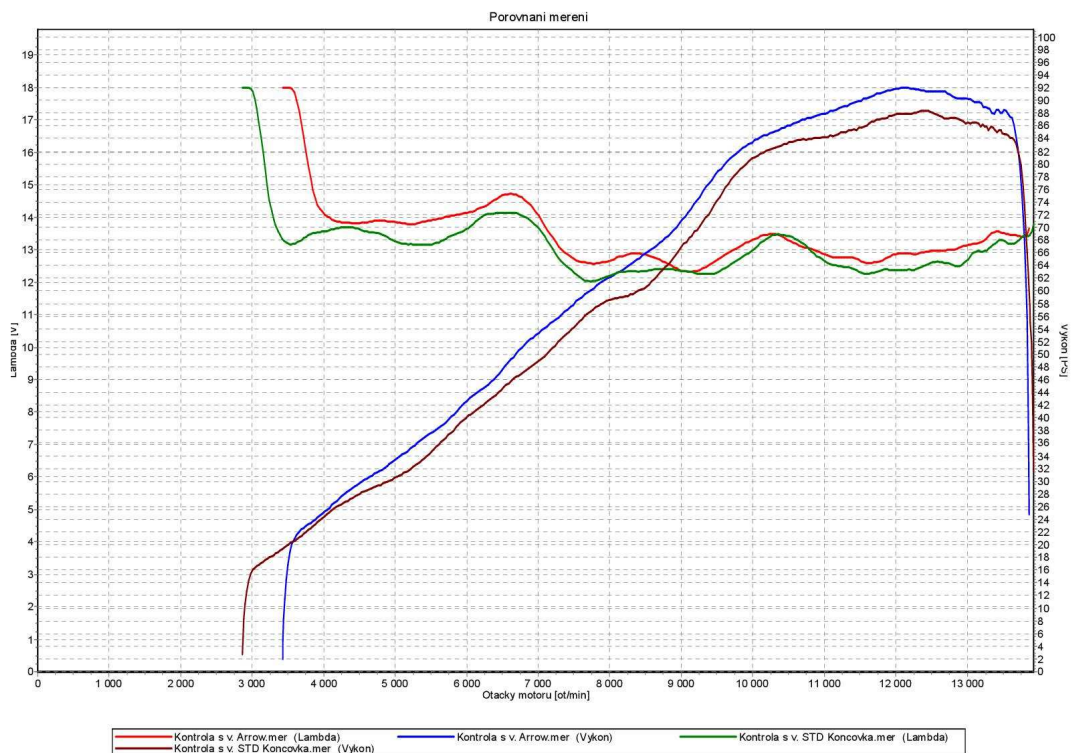
Vliv výfukového potrubí na vnější otáčkovou charakteristiku lze na grafu 6.8 pozorovat plynulejším průběhem měřených parametrů (tlumič Arrow). Například průběh točivého momentu u standardního výfukového tlumiče prodělává propady – přibližně při 5 000 ot/min a při 8 400 ot/min – které tlumič Arrow dokázal potlačit.

Na grafu 6.8 si lze také všimnout, že počátky křivek u měřených variant jsou vůči sobě na rozsahu otáček posunuty. Jedná se přibližně o 700 ot/min. U rozdílných výfuků tedy dochází k počátku výkonu při jiné hodnotě otáček.

Výsledky měření z hlediska plynulejšího průběhu výkonu splnily předpoklady. Dále se očekávalo, že s aktuálním nastavením karburátorů motocykl pomocí tlumiče Arrow nenavýší hodnotu maximálního výkonu motoru. Tento předpoklad byl chybný, měření ukázalo nárůst hodnoty maximálního výkonu o 2,66 kW.

## 6.5 Nastavení karburátorů

Software MotoCOMtest umožňuje pomocí signálu z externí lambda sondy naměřit průběh bohatosti směsi. Ten má upozornit především na chudé oblasti, při kterých dochází k tepelnému namáhání motoru. Ideálním složením směsi se u motocyklů v zátěži používá poměr 13,2–14,2:1. [30]



Obrázek 6.9: Porovnání měření

### 6.5. NASTAVENÍ KARBURÁTORŮ

Z grafu 6.9 je možné vidět, že u varianty se standardním výfukem se směs po celém průběhu otáček pohybuje převážně v oblasti bohaté směsi. U tlumiče Arrow dochází v rozmezí přibližně mezi 6 000–7 000 otáčkami k ochuzení směsi. Což je nežádoucí z důvodu tepelného namáhání motoru. Pro provozování motocyklu s tímto výfukovým tlumičem je vhodné provést u karburátorů patřičnou úpravu tvorby směsi.

Takovou úpravou se rozumí například úprava velikosti trysek, nové nastavení tlakových poměrů (u rovnotlakých karburátorů) nebo doladění tuhosti pružiny.

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat ucelený přehled informací o výfukovém potrubí motocyklu, popsání jeho jednotlivých částí a jejich vlivu na vnější otáčkovou charakteristiku čtyřdobého motocyklového motoru. Následným cílem bylo provedení experimentálního měření za účelem zjištění vlivu tlumiče výfuku na výkon a točivý moment motoru.

V úvodu práce jsou vypracovány informace o základních parametrech, výkonu, točivém momentu a charakteristikách spalovacích motorů. Následuje popis výfukového potrubí, měření výkonu motocyklu a následné experimentální měření.

Z dosažených informací lze říci, že nejvíce ovlivňuje křivky otáčkové charakteristiky sběrné potrubí, jehož geometrií, konfigurací a výběrem materiálu lze jednoznačně ovlivnit rezonanční délku potrubí. Jejíž správné zvolení ovlivňuje vyplachování válce a optimalizuje spalování. Za tímto účelem přední výrobci motocyklů vyvíjejí různé řízené systémy měnící proudění výfukových plynů podle potřeby optimálního plnění. A proto budou s největší pravděpodobností tyto systémy vyvíjeny a zlepšovány i nadále.

Výsledkem experimentálního měření bylo, že oproti standardnímu tlumiči dodávanému výrobcem byl zjištěn nárůst maximální hodnoty výkonu s tlumičem Arrow o 2,66 kW a nárůstu točivého momentu o 2,03 Nm. Změnou tlumiče bylo dosaženo i plynulejšího průběhu výkonu a točivého momentu motoru.

Člověk provozující motocykl v normální provozu tyto výsledky nejspíše nepozná, nicméně mohou posloužit jako odrazový můstek pro člověka zabývajícího se řešením této problematiky na závodní trati, kde mohou být výsledky nápomocné.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] BEROUN, Stanislav.: *Vozidlové motory*. Studijní opory, TU Liberec[online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1733>
- [2] ČERNOHOUS, Tomáš.: *Dvouválcový řadový vznětový motor s excentrickým klikovým mechanismem pro užitková vozidla* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/82520>. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [3] First Ride 2000 Honda CBR929RR. Street Motorcycle [online]. 22.02.2014 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://strmotorcycle.blogspot.cz/2014/02/first-ride-2000-honda-cbr929rr.html>
- [4] GSCHIEDLE, Rolf.: *Příručka pro automechanika*. 3., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [5] GSX-R1000 ABS: MAIN FEATURES. Suzuki [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.suzuki.hu/motor/en/product/gsx-r1000-abs-2018-1>
- [6] GSX-S1000 EXHAUST SYSTEM UPGRADE: GSX-S1000 details and mods. Suzuki GSX-S Info [online]. 16.09.2016 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://gsx-s.info/wp-content/uploads/2017/09/exhaust-3.jpg>
- [7] HROMÁDKO, Jan.: *Spalovací motory. Dynamika klikového ústrojí*. (Přednáška). Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, 2012
- [8] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA.: *Mechanika tekutin*. Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0038-1.
- [9] KREJČÍ, J. a T. DOŠEK.: *Teorie motoru, 2. díl: Čtyřtakt vs. dvoutakt*. ONLINE MOTOCYKL [online]. 2015, 05.04.2015 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.motocykl-online.cz/reportaze/22816-teorie-motoru-2-dil-ctyrtakt-vs-dvoutakt>
- [10] Měření výkonu. TDI fun chiptuning technology [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.tdifun.cz/mereni-vykonu/>
- [11] Motorkari.cz [online]. 27.5.2009 [cit. 2018-05-09]. Téma: Jak ztišit vývuk na MZ 150. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/tema/?t=63110>
- [12] PAGÁČ, Marek.: *Simulace proudění plynů ve výfukovém potrubí*. Mujsolidworks.cz [online]. 3. 11. 2014 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.mujsolidworks.cz/simulace-proudeni-plynu-ve-vyfukovem-potrubu/>
- [13] Powervalves: the open and shut case. MCN [online]. 28.01.2001 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcyclenews.com/news/2001/january/powervalves-the-open-and-shut-case/>
- [14] PÍŠTĚK, Václav. DRÁPAL, Lubomír.: *Hnací ústrojí. Kinematika excentrického klikového mechanismu*. (Přednáška). Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, 2012

- [15] PÍŠTĚK, Václav. DRÁPAL, Lubomír.: *Hnací ústrojí. Síly a momenty v klikovém mechanismu.* (Přednáška). Brno: VUT, Fakulta strojního inženýrství, 2012
- [16] ROLLINGER, Mirek.: *Zkratky systémů motocyklů.* Motorkáři.cz [online]. 18.10.2007 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/zkratky-systemu-motocyklu-4376.html>
- [17] ROLLINGER, Mirek.: *Technika motocyklu - 13. část - Výkon a kroutící moment: Zvyšování výkonu, měření.* Motorkáři.cz [online]. 7.8.2006 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-13.-cast-vykon-akroutici-moment-3636.html?kid=1117>
- [18] ROLLINGER, Mirek.: *Technika motocyklu - 13. část - Výkon a kroutící moment: Úvod.* Motorkáři.cz [online]. 7.8.2006 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-13.-cast-vykon-akroutici-moment-3636.html?kid=1116>
- [19] SAJDL, Jan.: *Koňská síla (kůň, k).* Autolexicon net [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konska-sila/>
- [20] Spark Exhaust Technology CBR 1000 RR ('08-'12) FULL TITANIUM SYSTEM, No Homologation [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.tpr-racing.nl/en/spark-exhaust-technology-cbr-1000-rr-08-12-full-ti-11939007.html>
- [21] SUCHÝ, Pavel.: *Výfuk: jen odpadní roura?* Motorkari.cz [online]. 20.5.2015 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/vyfuk-jen-odpadni-roura-31417.html>
- [22] Suzuki Exhaust Tuning-Alpha (SET-A) - 2017 GSX-R1000/R ABS [online]. 26. 10. 2016 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Fag-zr2wdj8>
- [23] ŠEVČÍK, Miroslav.: *Výfukové potrubí pro motor BMW* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/97027>. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [24] ŠMUCLER, Jan.: *Kroutící moment.* Šmucler magazín [online]. 2016, 31.10.2016 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.smucler.cz/blog/tocivy-moment/>
- [25] Tyll [online]. 2008 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://vyfuky-tyll.cz/vyfuky/produkty/>
- [26] VLK, František.: *Teorie a konstrukce motocyklů.* Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
- [27] VLK, František.: *Vozidlové spalovací motory.* Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [28] VLK, František.: *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel: Výkon vozidla, brzdové soustavy, motor, převodová ústrojí, odpružení, řízení, ovladatelnost, ekonomické systémy.* Brno: Vlk, 2001. ISBN 80-238-6573-0.

- [29] Yamaha Technology 1987: Exhaust Ultimate Power Valve - EXUP. YamahaPart [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.yamahapart.com/page/exhaustultimatepowervalveexup>
- [30] Zařízení pro měření točivého momentu a výkonu motorů: Principy měření pro pokročilejší. MotoCOMtest [online]. 2004 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.motocom.cz/mereni2.htm>
- [31] Zařízení pro měření točivého momentu a výkonu motorů: Využití a způsoby měření. MotoCOMtest [online]. 2004 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.motocom.cz/mereni.htm>
- [32] Zařízení pro měření točivého momentu a výkonu motorů: Produkty. MotoCOMtest [online]. 2004 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.motocom.cz/mereni.htm>



## 9 Seznam použitých zkratek a symbolů

$a$	[ $m/s^2$ ] zrychlení posuvných částí
$D$	[mm] průměr (vrtání) válce
$D_h$	[m] hydraulický průměr potrubí
$e$	[mm] excentricita
$F_c$	[N] celková síla působící na píst
$F_o$	[N] sílu působící v ose ojnice
$F_p$	[N] síla od tlaku plynů
$F_s$	[N] setrvačná síla posuvných částí klikového ústrojí
$i_v$	[-] počet válců motoru
$L$	[m] délka potrubí
$l$	[mm] délka ojnice
$L_{VT}$	[kg/kg] teoretické množství suchého vzduchu
$k$	[-] koeficient
$m$	[kg] hmotnost
$m_d$	[kg] hmotnost čerstvé náplně dopravené do válce
$m_{dcelk}$	[kg] hmotnost veškeré náplně dopravené do všech válců motoru
$M_p$	[kg] hmotnost paliva ve směsi
$m_p$	[kg] hmotnost posuvných částí
$M_t$	[Nm] krouticí moment
$m_t$	[kg] hmotnost čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu válce
$M_V$	[kg] hmotnost suchého vzduchu směsi
$n$	[1/min] otáčky motoru
$N_b$	[N] normálová sílu
$p$	[Pa] tlak
$p_0$	[MPa] tlak v klikové skříni
$p_1$	[MPa] tlak ve spalovacím prostoru

$P_e$	[kW] efektivní výkon
$p_e$	[MPa] střední efektivní tlak oběhu
$P_i$	[kW] indikovaný výkon
$p_i$	[MPa] střední indikovaný tlak oběhu
$r$	[J/kg · K] měrná plynová konstanta
$r_k$	[m] poloměr ramene klikového hřídele
$T$	[K] teplota
$R_e$	[-] Reynoldsovo číslo
$V$	[m <sup>3</sup> ] objem
$v$	[m <sup>3</sup> /kg] měrný objem
$v_p$	[m/s] rychlost proudění
$V_z$	[dm <sup>3</sup> ] zdvihový objem motoru
$W$	[J] indikovaná práce za celý pracovní oběh
$Y_{zd}$	[J/kg] délkové ztráty
$Y_{zm}$	[J/kg] místní ztráty
$Z_D$	[mm] zdvih pístu v dolní úvrati
$Z_H$	[mm] zdvih pístu v horní úvrati
$\alpha$	[°] natočení klikové hřídele
$\beta$	[°] úhel odklonu ojnice
$\lambda$	[-] součinitele přebytku vzduchu
$\lambda_d$	[-] třecí součinitel
$\lambda_p$	[-] teoretického stupně plnění
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s] dynamická viskozita
$\xi_d$	[-] délkový ztrátový součinitel
$\xi_m$	[-] místní ztrátový součinitel
$\rho_t$	[kg/dm <sup>3</sup> ] teoretická hustota náplně
$\omega$	[1/s <sup>1</sup> ] úhlová rychlost